

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Vliv vysoce efektivních frézovacích strategií na povrchová
napětí při frézování materiálu Toolox44**

**Effect of highly efficient milling strategies of residual
stresses after milling materiál Toolox44**

Student:

Bc. Radek Plevák

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pagáč

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Plevák**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv vysoce efektivních frézovacích strategií na povrchová napětí při frézování materiálu Toolox44**
Effect of Highly Efficient Milling Strategies of Residual Stresses after Milling Material Toolox44

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Rozbor současného stavu.
3. Vliv vysoce-efektivních frézovacích strategií na obráběcí proces.
4. Měření povrchových napětí na experimentálních dílech.
5. Vyhodnocení, závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] HAVRILA, Michal; ZAJAC, Jozef; BRYCHTA, Josef; JURKO, Jozef; *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [4] ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč**

Datum zadání: 12.12.2014

Datum odevzdání: 18.05.2015




Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

13.5.2015

V Ostravě:



.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдоміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдоміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

13.5.2015

V Ostravě:

.....

Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Radek Plevák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ořechov 272, PSČ: 687 37

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PLEVÁK, Radek. *Vliv vysoce efektivních frézovacích strategií na povrchová napětí při frézování materiálu Toolox44*. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015, 69 s. Diplomová práce, vedoucí práce: Pagáč, M.

Diplomová práce se zabývá vysoce efektivními frézovacími strategiemi a jejich vlivem na obrobený povrch z hlediska povrchových napětí po frézování materiálu Toolox 44. V úvodní části práce je popsána problematika povrchového napětí, zejména vznik napětí a rozbor metod, které jsou nejčastěji použity pro měření vzniklých napětí. V další části jsou nastíněny CAD/CAM systémy. Při použití těchto systému dochází k zjednodušení a také k zefektivnění výroby. V současné době je na trhu velké množství těchto systémů a jsou využívány v různých odvětvích průmyslu. Pro experimentální část práce byly vybrány ty CAM systémy, které obsahují vysoce efektivní frézovací strategii. Výsledkem experimentu je posouzení vlivu vysoce efektivní frézovací strategie na povrchová napětí, co do velikosti a směru.

Klíčová slova

Povrchové napětí, vysoce efektivní frézovací strategie, CAD/CAM, RTG difrakce

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

PLEVÁK, Radek. *Effect of highly efficient milling strategies of residual stresses on milling material Toolox44*. Ostrava: Department of machining, assembly and engineering metrology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2015, 69 p. Leader of thesis: Pagáč, M.

This thesis deals with a highly efficient milling strategies and with their impact on the machined surface, mostly on the surface tension while milling the material Toolox 44. The introductory part describes the problems of surface tension, especially the emergence of tensions and analysis of methods that are most commonly used to measure the resulting voltage. The next section outlines CAD / CAM systems. When using such a system leads to the simplification and streamlining of the production. Currently on the market a large number of these systems are used in various industries. For the experimental part of the work we were selected CAM systems, which include highly efficient milling strategy.

The purpose of the experiment is to evaluate whether a highly efficient milling strategies are affecting surface tension in size and direction.

Key words

Residual stresses, highly efficient milling strategy, CAD / CAM, X-ray diffraction

Seznam použitých symbolů a značek

Symbol	Popis	Jednotka
A ₅	tažnost	[%]
Breadth	Integral breadth - integrální šířka	[°]
C	uhlík	[-]
CAD	Computer Aided Design - konstruování s počítačovou podporou	[-]
CAM	Computer Aided Manufacturing - řízení výroby s počítačovou podporou	[-]
CET	uhlíkový ekvivalent	[%]
CNC	Computerized Numerical Control – číslicové řízení počítačem	[-]
Cr	chrom	[-]
ČR	Česká republika	[-]
FWHM	Full Width at Half Maximum - celá šířka při polovičním maximu	[°]
HBW	zkouška tvrdosti podle Brinella	[-]
HRC	zkouška tvrdosti podle Rockerlla	[-]
HSC	High Speed Cutting – Vysokorychlostní řezání (obrábění)	[-]
HV _{Ms}	mikrotvrdost na povrchu (zpevnění)	[-]
HV _{Mz}	mikrotvrdost základního materiálu	[-]
H ₂ O	voda	[-]
Mn	mangan	[-]
Mo	molybden	[-]
Ni	nikl	[-]
P	fosfor	[-]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	[μm]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
Rp _{0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
RTG	rentgenové záření	[R]
S	síra	[-]
Si	křemík	[-]
Strain*E3	poměrné prodloužení v měřítku 1000:1	[-]
T	teplota	[°C]
V	vanad	[-]
2Theta	difrakční úhel (Braggův úhel)	[°]
a	jiskrová mezera u elektroerozivního obrábění	[mm]
a _c	radiální hloubka řezu	[mm]
a _p	axiální hloubka řezu	[mm]
d	vzdálenost krystalografických rovin	[nm]

Symbol	Popis	Jednotka
f_z	posuv na zub	[mm]
h	skutečná vzdálenost vpichů	[mm]
kg	hmotnost	[kg]
kHz	frekvence (kmitočet)	[Hz]
kWh	energie	[Wh]
p	tlak	[MPa]
t	čas	[s]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
β	beta	[°]
ε	relativní (poměrné) prodloužení	[-]
θ	úhel difrakčního kužele	[°]
λ	vlnová délka	[mm]
σ	napětí	[MPa]
σ	normálové zbytkové napětí	[MPa]
τ	tangenciální (smykové) zbytkové napětí	[MPa]
φ	stupeň zpevnění povrchu	[%]
ψ	psí	[°]

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek.....	6
Úvod	11
1. Zbytkové napětí.....	13
1.1 Nerovnoměrná plastická deformace	14
1.2 Nerovnoměrné tepelné ovlivnění	14
1.3 Strukturní změny materiálu	15
2. Rozdělení zbytkových napětí.....	17
2.1 Zbytková napětí I. druhu	17
2.2 Zbytková napětí II. druhu	18
2.3 Zbytková napětí III. druhu	18
3. Metody měření zbytkových napětí	20
3.1 Destruktivní metody měření	22
3.1.1 Postupné odleptávání povrchových vrstev	22
3.1.2 Metoda kolmých řezů	22
3.1.3 Metoda šikmých řezů	22
3.2 Polodestruktivní metody měření	23
3.2.1 Odvrtávací metoda.....	24
3.3 Nedestruktivní metody měření	25
3.3.1 Barkhausenův šum	25
3.3.2 Ultrazvuková metoda	27
3.3.3 Rentgenová difrakce	28
4. CAM/CAD systémy	30
4.1 CAM systémy	30
4.2 Strategie CAM systémů	30
4.2.1 Hrubovací strategie CAM systémů	31
4.2.2 Polodokončovací strategie CAM systémů	32
4.2.3 Dokončovací strategie CAM systémů.....	32
5. Návrh a realizace experimentální činnosti	34
5.1 Polotovary (dílec)	35

5.2	Materiál dílce - Toolox 44	35
5.3	Obráběcí stoj	37
5.4	Řezné nástroje	38
5.4.1	Hrubovací operace	38
5.4.2	Dokončovací operace	39
5.4.3	Zhotovení šikmé plochy	40
5.5	Upnutí nástroje	42
5.6	Upnutí obrobku	43
5.7	Použité frézovací strategie	44
6.	Měření povrchového napětí	46
6.1	Měřicí zařízení (X-ray difraktometr)	47
7.	Naměřené hodnoty	55
Závěr		58
Závěry pro praxi		60
Doporučení pro další zkoumání		60
Poděkování		61
Seznam použité literatury		62
Seznam příloh		65
Příloha A		66
Příloha B		67

Úvod

V dnešní době dochází k vývoji ve všech oblastech, kterými jsme obklopeni. Nedílnou součástí vývoje je i strojírenský průmysl, kde dochází stále více k využívání PC a různých CAD/CAM softwarů, kterých je na dnešním trhu velké množství. Díky využití PC a těchto softwarů dochází k zvýšení pružnosti a jednoduchosti výroby, zvýšení produktivity a mnoho dalších aspektů.

Není tomu dávno, kdy docházelo k zapisování NC kódu na děrnou pásku. Tento druh zapisování nesl velké riziko lidského faktoru, eliminaci obráběných ploch a také časovou náročnost na zhotovení daného programu. V dnešní době díky CAM systémům dokážeme naprogramovat jakoukoliv plochu za velmi malý časový úsek, kdy dochází k odladění programu na grafické simulaci a tím se částečně eliminuje lidský faktor. Také v nabídkách CAM systémů je velká škála zásuvných modulů, které slouží pro určité zaměření. Za povšimnutí stojí i dostupnost a technická podpora jednotlivých systémů, která je více jak dostačující.

Vývoj se také projevil u technologií obrábění a obráběcích strojů, kdy dochází k číslicovému řízení stroje, obrábění v několika osách a spojení soustružnických a frézovacích operací do jednoho stoje (obráběcí centrum). U všech zmiňovaných aspektů je ještě velká škála věcí, které stojí za povšimnutí a další zdokonalení.

Tato práce je vypracována na téma „Vliv vysoce efektivních frézovacích strategií na povrchová napětí při frézování materiálu Toolox44“. Cílem práce je zjištění vlivu vysoce efektivní frézovací strategie na povrchové napětí, při frézování materiálu Toolox 44. Je vybráno několik CAM systémů, které mají ve své nabídce vysoce efektivní frézovací strategie a těmito strategiemi jsou zhotoveny předem vybrané plochy. Na těchto plochách docházelo po zhotovení dané součásti k měření povrchových napětí. Povrchové napětí byly měřeny ve spolupráci s Katedrou obrábění a výrobní techniky ze Strojnické fakulty Žilinské univerzity v Žilině nedestructivní metodou - X-ray difraktometrem.

Materiál součásti je zvolen Toolox 44. Jedná se o materiál, který se vyznačuje dobrou obrobitelností i při vysoké tvrdosti materiálu. Tento materiál se používá nejčastěji pro výrobu forem, lisovacích nástrojů a také pro výrobu součástí strojů, jako jsou například vodící lišty. Při výrobě forem jsou nejčastěji použity třískové metody obrábění a to převážně frézování. Díky vývoji nových materiálů, které jsou stále více těžko obrobitelné, dochází k obrábění i nekonvenčními metodami obrábění. Nekonvenční metody obrábění se volí převážně tam, kde nelze zhotovit daný povrch některou z metod třískového obrábění nebo u těžce obrobitelných materiálů.

Povrchové napětí patří v dnešní době k velmi diskutovanému tématu. Vzniklé povrchové napětí jsou jedním z faktorů, které mají vliv na kvalitu obrobeneho povrchu. Kvalitu povrchu ovlivňuje ještě spousta dalších faktorů, mezi které patří tvarová a rozměrová přesnost obrobku, metalurgické zpracování daného materiálu a také způsob obrábění.

Velká část poruch materiálu za provozu vzniká na povrchu součásti nebo v jeho těsné blízkosti, kdy velký podíl na těchto poruchách mají právě povrchová napětí. Z toho důvodu kvalita povrchu ve strojírenském průmyslu a nejen v něm hraje podstatnou roli.

V technické praxi se povrchová napětí vyskytují vždy v určité podobě. Můžeme je nalézt jako tahová, tlaková nebo smyková. Vyskytují se v celém objemu (průřezu) materiálu, nebo jen v určité dané části. Každá technologie obrábění má určitý charakter a podíl na vzniku těchto napětí. Vzniklé napětí mohou působit na danou součást kladně, ale i záporně. Nelze jednoznačně říct, které napětí jsou lepší, nebo horší. Záleží především na tom, za jakých podmínek a k čemu bude daná součást použita.

1. Zbytkové napětí

Je to takový druh napětí, který vzniká po procesu technologických operací. Technologické operace jsou jednou z posuzovacích kritérií pro určení stavu a vlastností povrchové vrstvy součástí. Vzniklé napětí rozdělujeme do tří částí. Jedná se o napětí tahové (+), tlakové (-) a smykové napětí. [1]



Obr. 1.0 – a) tahové napětí b) tlakové napětí c) smykové napětí [6]

Tato vzniklá napětí působí na součást kladně i záporně. Mají velký podíl na pevnosti (statické i dynamické) a odolnosti proti korozi. Mezi kladnější napětí považujeme napětí tlakové. Nejčastěji vzniká při obrábění, pokud převažuje plastická deformace bez tepelného působení. Tlakové napětí také napomáhá k uzavírání zárodků trhlin. Tuto vlastnost lze zařadit do kladných vlastností tlakového napětí. [2]

Tahová napětí působí na součást záporně. Díky působení tohoto napětí dochází k únavovým lomům. Nejčastější vznik lomů způsobuje zatěžování povrchu současně tepelným a mechanickým zatěžováním. Při procesu obrábění dochází v povrchových vrstvách k ohřevu a tyto vrstvy jsou plasticky zkráceny. Po vyrovnání teplot dochází v těchto vrstvách ke vzniku tahových napětí. Díky působení strukturních a chemických změn dochází k zmenšení nebo zvětšení objemu. U zvětšení objemu to jsou tlakové napětí, u zmenšení objemu tahová napětí. [2]

Ke vzniku zbytkového napětí napomáhá každá technologická operace jiným způsobem a velikostí ovlivněného objemu materiálu, ve kterém dokáže způsobit plastickou deformaci a tepelně jej ovlivnit. [3]

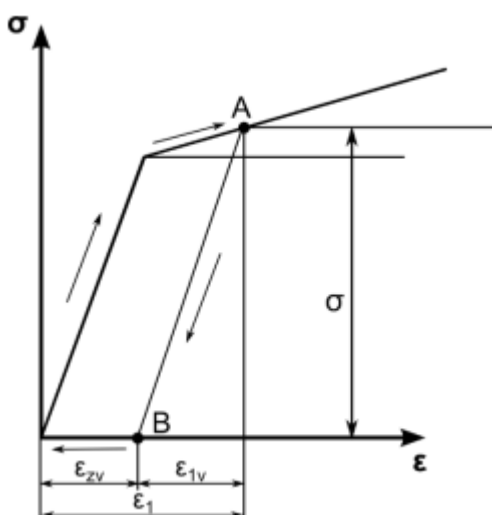
Za příčiny vedoucí k vzniku zbytkových napětí jsou považovány tyto parametry:

- nerovnoměrná plastická deformace,
- nerovnoměrné tepelné ovlivnění,
- strukturní změny materiálu,
- vznikající chemické procesy. [2]

1.1 Nerovnoměrná plastická deformace

Vlivem technologických procesů dochází k přetvoření plastických povrchových vrstev, ale jádro materiálu je deformováno jen pružně. Díky vnikání řezného klínu do materiálu, při nízkém tepelném ovlivnění, dochází k vzniku plastických deformací. Tyto deformace vznikají pouze v tenké povrchové vrstvě. Se zvyšujícím se objemem ovlivněného materiálu dochází k přitisknutí nedeformovaných vrstev jádra a tím k pružné deformaci. Po ukončení vnikání řezného klínu se vrstvy, které jsou pružně deformovány, snaží dosáhnout své stávající polohy a tlačí na vrchní deformované vrstvy. Díky tomu dochází v povrchových vrstvách ke vzniku zbytkového napětí. [4]

Podstatu těchto napětí lze popsat pomocí zjednodušeného pracovního diagramu většiny materiálu. Pokud zatížení přesáhne meze kluzu, po uvolnění (odlehčení) deformace nepokračuje podle stávající křivky, ale její směr je rovnoběžný s přímkou reálného diagramu. [6]



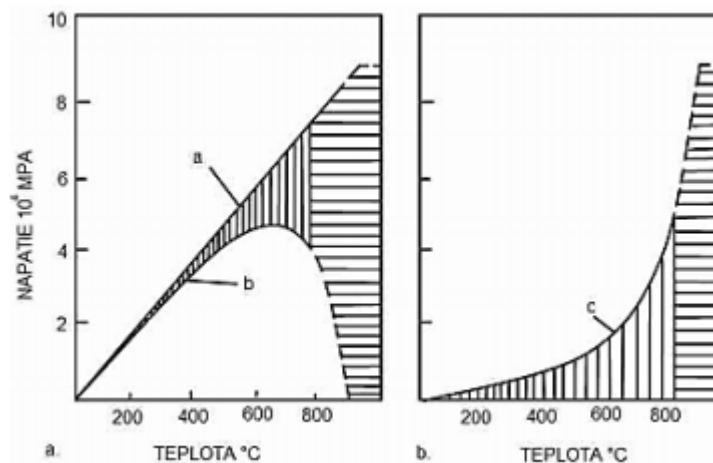
Obr. 1.1 – Schématický diagram materiálu s trvalou deformací [5]

1.2 Nerovnoměrné tepelné ovlivnění

Zbytková napětí vznikají při nerovnoměrném ohřevu nebo ochlazování. Tato napětí se také nazývají termonapětí. Při ohřevu dochází k ohřevu povrchové vrstvy a tím k její roztlačnosti. Povrchová vrstva, u které dochází k ohřevu, je pevně spojena s jádrem materiálu. Jádro materiálu při ohřevu zůstává neovlivněné teplem a neroztahuje se, ale dochází ke vzniku tlakového napětí. [5]

Pokud by modul pružnosti byl během zahřívání konstantní, vnitřní napětí by probíhaly podle čáry **a**. Tomu však tak není a modul pružnosti se mění vlivem teploty. Skutečný průběh vnitřních napětí při ohřevu je znázorněn pomocí čáry **b**. Tyto čáry (čára **a** a **b**) jsou

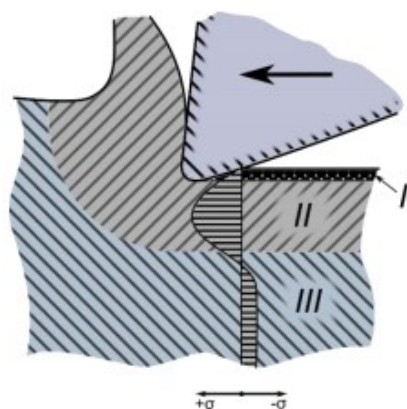
vyobrazeny na obrázku 1.2. Při chladnutí dochází v povrchové vrstvě ke smršťování (plastické deformaci) a to má za následek vznik tahových vnitřních napětí. Tyto napětí jsou větší než vnitřní tlakové napětí, které vznikly při ohřevu. Modul pružnosti ochlazené vrstvy je vyšší než modul pružnosti v ohřátém stavu. Rozdíl těchto hodnot (vnitřních napětí při ohřevu a ochlazení) určuje hodnotu v povrchové vrstvě tepelných zbytkových napětí. [5]



Obr. 1.2 – Schéma vzniku tepelných zbytkových napětí [5]

1.3 Strukturní změny materiálu

Tyto změny vznikají pouze u kovových součástí a jejich slitin (musí být schopny fázových přeměn). Ke změnám dochází v povrchových vrstvách a to díky změně měrných objemů jednotlivých struktur. Zbytková napětí vznikají, když dojde k vytvoření nových struktur v povrchových vrstvách. Ke vzniku vytvoření nových struktur napomáhá do velké míry druh technologie obrábění (soustružení, frézování, protahování atd.) Zde musíme brát ohled i na řezný nástroj. Nástroj není ideálně ostrý a v průběhu obrábění neodřeže celou hloubku materiálu, ale určitou hloubku zatlačí do obrobeného povrchu. Díky tomu dochází k plastické deformaci. Dochází ke zvětšení měrného řezného objemu a naopak klesá hustota obráběného materiálu. K vzniku tlakového zbytkového napětí dojde v povrchové vrstvě při zvýšení měrného objemu. [5]



I – Oblast tlakových napětí, které jsou vyvolané třením hřbetu nástroje o obrobenou plochu

II – Oblast tahových napětí (plastické stlačování materiálu)

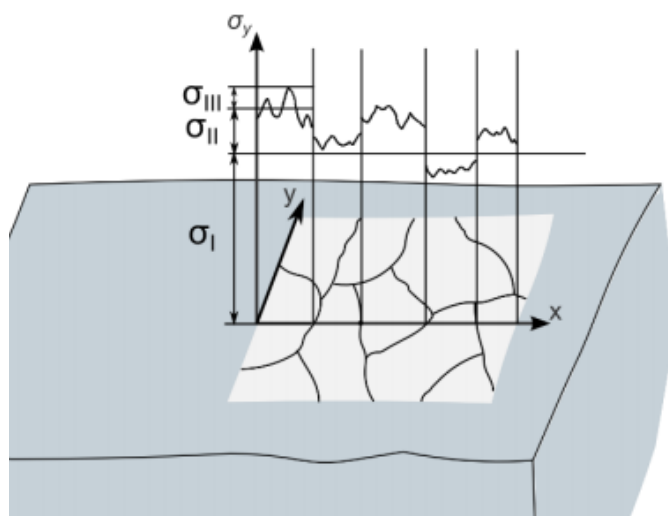
III – Neovlivněná vrstva

Obr. 1.3 – Vznik zbytkových napětí vlivem nástroje [5]

2. Rozdělení zbytkových napětí

Zbytková napětí můžeme rozdělit do několika skupin. Rozdělení můžeme provést z pohledu velikosti objemů, v nichž se napětí nemění co do směru i velikosti. Podle těchto ukazatelů se napětí rozděluje podle Macheraucha a Tietze do 3 skupin. Jedná se o:

- zbytková napětí I. druhu,
- zbytková napětí II. druhu,
- zbytková napětí III. druhu. [1]



Obr. 1.4 – Druhy zbytkového napětí [6]

2.1 Zbytková napětí I. druhu

Tyto napětí se nazývají také jako makroskopická a to především proto, že jsou zhruba stejně homogenní v makroskopické oblasti (více zrn materiálu). Celá oblast se nachází v rovnováze, zejména vnitřní síly a momenty, které jsou spojené se zbytkovým napětím. Případný zásah do této rovnováhy vyvolá makroskopické změny rozměrů. [1]

Makroskopická napětí vznikají především různými výrobními technologiemi. Mezi základní můžeme zařadit:

- obrábění (soustružení, frézování, vrtání, broušení a hoblování),
- spojování (svařování, pájení a lepení),
- lití,
- tváření (tažení, válcování, kování, tlacení a kuličkování),
- tepelné nebo tepelně-mechanické zpracování (kalení, cementování a nitridování),
- vytváření krycích vrstev – povlaků (galvanizace, plátování, protahování, stříkání a zinkování). [1]

Zbytková napětí I. druhu mohou být také důsledkem montážních, dopravních, provozních a zkušebních zatížení odlišného charakteru. [7]

2.2 Zbytková napětí II. druhu

Také nazývána jako mikroskopická. Vznikají v oblasti jednoho zrna nebo jeho části. Zbytkové napětí, které působí v dané oblasti, především vnitřní síly a momenty, jsou v rovnováze. Pokud dojde k narušení dané rovnováhy, dochází ke vzniku mikroskopické deformace. Při porušení rovnováhy nemusí dojít ke změně tvaru uvažovaného tělesa. [1]

Mikroskopická napětí vznikají:

- při tepelných procesech v materiálu s fázemi majícími rozdílné hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti,
- při deformaci materiálu skládajících se buď z jedné fáze, nebo z více fází s různými mechanickými vlastnostmi. [7]

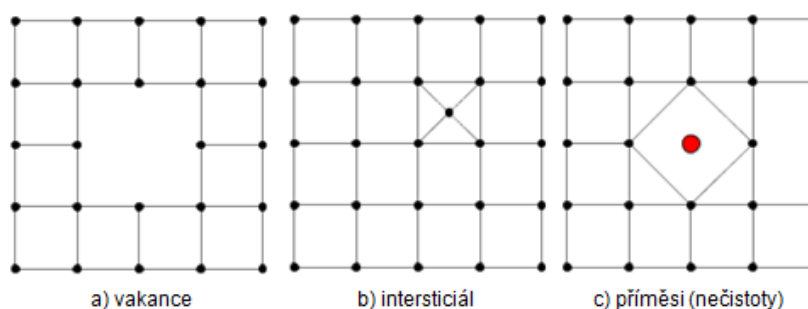
2.3 Zbytková napětí III. druhu

Zbytková napětí III. druhu jsou nazývána také jako submikroskopická. Vyskytují se v několika atomových vzdálenostech a nepřekročí objem zrna materiálu. Ve sledovaném úseku zrna se pozorují především vnitřní síly a momenty, které jsou v rovnováze. Pokud dojde k porušení rovnováhy, dochází k ultramikroskopickým změnám rozměru. Nejčastější poruchy jsou tzv. strukturní poruchy. [1]

Mezi strukturní poruchy řadíme:

- poruchy bodové (vakance, intersticiály, nečistoty),
- poruchy čárové (dislokace hranové, šroubové, smíšené),
- poruchy plošné (hranice zrn, vrstvené chyby). [1]

Na obrázku 1.5 jsou zobrazeny strukturní poruchy bodové.



Obr. 1.5 – Strukturní poruchy bodové [8]

V každém bodě tělesa součásti se vyskytují všechny tři druhy zbytkového napětí. I když může být hodnota zbytkového napětí I. a II. druhu nulová, v technické praxi jsou napětí III. druhu vždy nenulová. Hodnoty zbytkového napětí jsou použity především pro posuzování spolehlivosti konstrukce, kde je využívají především konstruktéři a výpočtáři. [7]

3. Metody měření zbytkových napětí

Pro měření zbytkových napětí existuje několik metod. Pro názornou ukázkou jsou některé vypsány v tabulce 1.0. Tyto metody můžeme rozdělit do dvou základních rozdělení. Jedná se o rozdělení podle porušení materiálu a podle principu. Žádná z metod pro měření zbytkových napětí není univerzální a každá metoda se vyznačuje a liší svým charakterem. Zbytkové napětí se měří pomocí průvodních jevů jako je deformace, vodivost atd.

Samotné měření se provádí v těsné blízkosti měřeného povrchu, nebo v celém průřezu materiálu. [7]

Rozdělení metod měření zbytkových napětí podle porušení materiálu jsou:

- metody destruktivní,
- metody polo destruktivní,
- metody nedestruktivní. [7]

Dále můžeme metody pro měření zbytkového napětí rozdělit podle principu:

- mechanické,
- fyzikální,
- chemické. [7]

Tabulka 1.0 - Přehled metod měření zbytkových napětí [1]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
			podélné pásy z kroužků
	obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě
		křehké laky	vznik trhlin
		křehké modely	vznik trhlin
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	dífuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

3.1 Destruktivní metody měření

U destruktivních metod dochází důsledkem měření k znehodnocení měřené součásti a měření se provádí na zkušební součásti (vzorku).

Po každé metodě obrábění vzniká deformace povrchové vrstvy. Tato vzniklá deformace způsobí změnu fyzikálně-mechanických vlastností, mikrostruktury a především tvrdosti. Hlavními ukazateli zpevněné obrobené plochy je stupeň a hloubka zpevnění. Tyto parametry se dají zjistit pomocí mikrostruktury. Metody, které nám umožňují měřit parametry zpevnění, jsou:

- postupné odleptávání povrchových vrstev,
- metoda kolmých řezů,
- metoda šikmých řezů. [9]

3.1.1 Postupné odleptávání povrchových vrstev

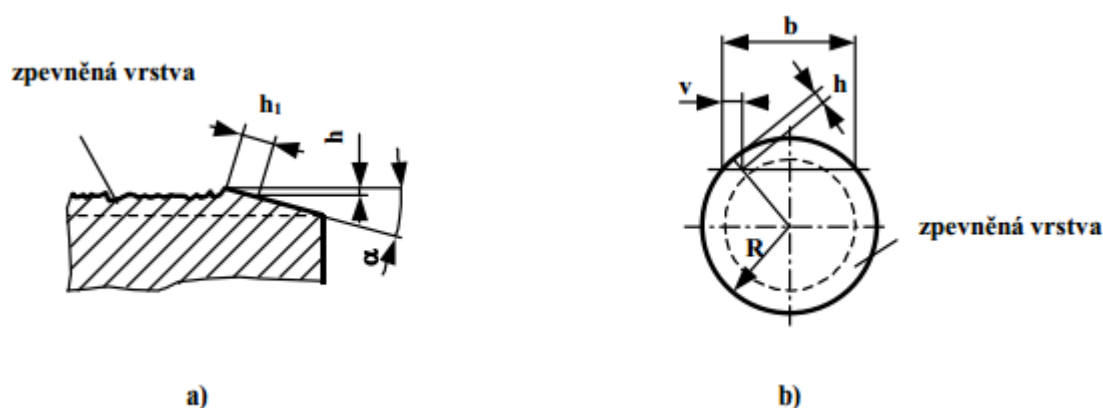
Tato metoda se vyznačuje mnoha nevýhodami. Mezi nejzákladnější můžeme vyjmenovat finančně nákladné zařízení k leptání, nerovnoměrnost povrchu po leptání, díky tomu i nesnadné měření na nerovnoměrném povrchu. [9]

3.1.2 Metoda kolmých řezů

Metoda se využívá tam, kde je zapotřebí měřit zpevnění ve větší hloubce (0,5 – 1 mm). Jedná se o velmi jednoduchou metodu. [9]

3.1.3 Metoda šikmých řezů

Oproti metodě kolmých řezů se metoda šikmých řezů využívá jen tam, kde zpevnění zasahuje do malé hloubky. Na zkoušeném vzorku se provede výbrus na rovinných površích pod úhlem $\alpha = 2^\circ$. U válcového vzorku se provede metalografický výbrus. Výbrusy se provádí pro zvýšení rozsahu měření mikrotvrdosti ovlivněné vrstvy. [9]



Obr. 1.6 – Výbrus vzorků pro hodnocení zpevnění povrchové vrstvy

a) výbrus na rovinném povrchu, b) metalografický výbrus [9]

Skutečná vzdálenost vpichu h od povrchu se určí:

- U rovinného vzorku

$$h = h_1 \cdot \sin \alpha \quad [\text{mm}] \quad (1.0)$$

- U válcového vzorku

$$h = R - \sqrt{R^2 + v^2 - b \cdot v} \quad [\text{mm}] \quad (1.1)$$

Vpichy se provádějí v několika rovinách a hloubce. V hloubce, kde se provedl vpich, se určí průměrná hodnota mikrotvrdosti. Vpichy se provádí od povrchu směrem k základnímu materiálu, až po hodnotu mikrotvrdosti základního materiálu. Výsledný stupeň povrchu se určí:

$$\varphi = \frac{HV_{Ms} - HV_{Mz}}{HV_{Mz}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

Kde: HV_{Ms} – mikrotvrdost na povrchu (zpevnění)

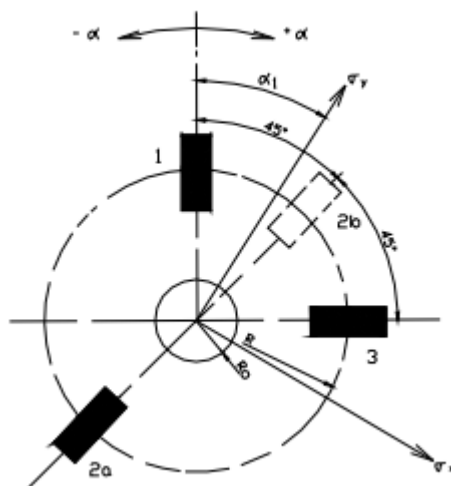
HV_{Mz} – mikrotvrdost základního materiálu [9]

3.2 Polodestruktivní metody měření

Tyto metody se také nazývají semidestruktivní. Měření se provádí na přídavné ploše. Po provedení měření se daná plocha odstraní, nebo se měření provádí na ploše, která je méně významná a nepodléhá přesnosti a funkčnosti součásti. Plocha, na které je provedena zkouška se zachovává a neodstraňuje se. Mezi polodestruktivní zkoušky patří odvrtávací metoda. [12]

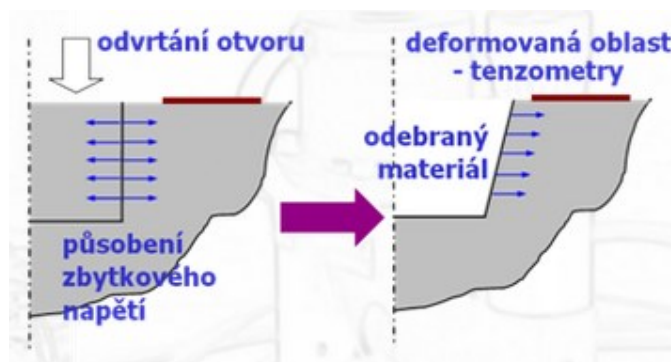
3.2.1 Odvrtávací metoda

Tato metoda je nazývána také jako Matharova a to podle jména autora, který ji v roce 1934 zveřejnil. K měření docházelo pomocí průtahoměru. Zdokonalení metody přišlo v roce 1950, kdy místo průtahoměru byly použity odporové tenzometry. Jedná se o metodu, kterou se zbytkové napětí měří nejčastěji. Především díky jednoduchosti měřicí soupravy a také díky tomu, že metoda nepoškozuje funkčnost součásti, i přes zásah do některých ploch. Metoda se provádí vyvrtáním otvoru, nejčastěji o průměru 1 až 4 mm, do hloubky 1 - 1,5 x D. Vyvrtáním otvorů se uvolní zbytkové napětí, které má za následek deformaci v okolí vrtaného otvoru. Po odvrtání otvorů se zjistí velikost vzniklé deformace. Měření se provádí pomocí tenzometrů, které jsou rozmístěny do tenzometrické růžice, která je zobrazena na obrázku 1.7. [7]

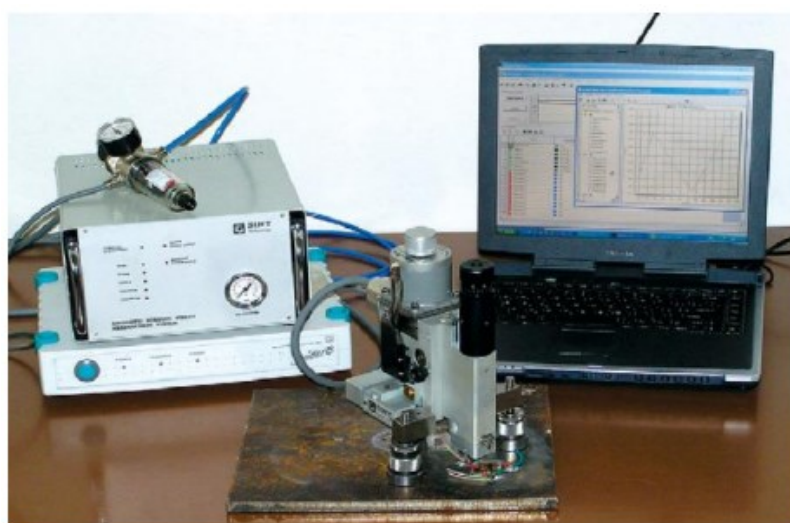


Obr. 1.7 – Tenzometrická růžice [10]

Měření přímo na okraji vrtaného otvoru není možné. Vzniklá deformace se měří až od určité vzdálenosti. Osa vrtaného otvoru se musí shodovat s osou tenzometrické růžice. Za nejvhodnější otvor se považuje otvor, který má přesný kruhový tvar, dno otvoru je rovné a hrany ostré. Otvor se nejčastěji zhotovuje frézou. Pro těžkoobrobitelné materiály se otvor zhotovuje pomocí kombinace vzduchové turbíny a nástroje z karbidu. Přesnost měření ovlivňuje velké množství faktorů. Za hlavní faktory jsou považovány vnesení dalších napětí během vrtání otvorů (závisí na technologii obrábění a nástroji), vychýlení osy otvoru a tenzometrické růžice (excentricita) a úprava ploch, na které jsou nalepeny tenzometrické růžice, u kterých může dojít k vnesení dalších napětí. Na okraji vrtaného otvoru je deformace nejvyšší a směrem do materiálu deformace postupně klesá. [7]



Obr. 1.8 – Schéma principu odvrtávací metody [11]



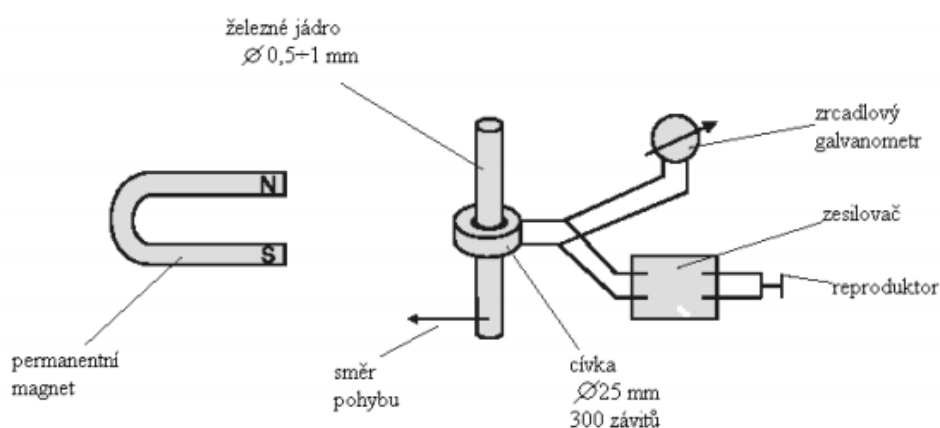
Obr. 1.9 – Odvrtávací zařízení SINT-MTS 3000 s vyhodnocovacím softwarem [6]

3.3 Nedestruktivní metody měření

Jsou to metody, u kterých nedochází k poškození součástí. Mezi tyto metody měření řadíme metodu Barkhausenova šumu, ultrazvukovou metodu a rentgenovou difrakci. [12]

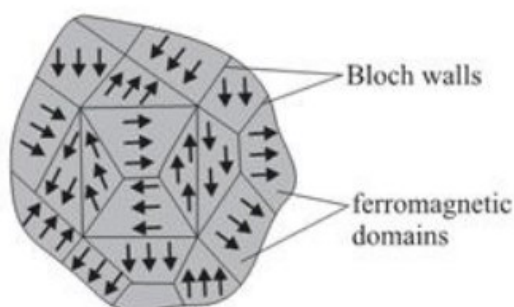
3.3.1 Barkhausenův šum

Jedná se o metodu, kterou poprvé popsal profesor Heinrich Georg Barkhausen v roce 1919. Metoda je založena na principu Barkhausenova šumu. [12]



Obr. 2.0 – Původní Barkhausenovo rozdělení [13]

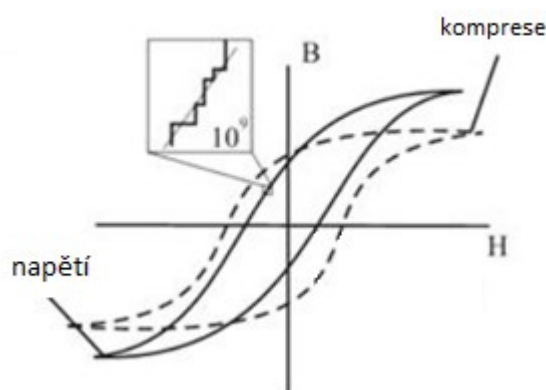
Šum v materiálu je vyvolán pohybem stěn domén. Zaznamenávaný šum je nejčastěji ve formě napěťových impulzů, které vznikají v cívce a akustického šumu. Pohyb je vyvolán měnícím se magnetickým polem ve zkušebním vzorku. Metoda se využívá u feromagnetických materiálů. Tyto materiály jsou složeny jakoby z malých magnetických oblastí, podobajících se tyčovému magnetu. Magnetické oblasti se nazývají domény, které se magnetizují podél krystalografických směrů. [12]



Obr. 2.1 – Feromagnetické materiály - domény [14]

Doménové stěny, nazývané také jako Blochovy, které oddělují jednotlivé domény. Aby došlo k pohybu doménové stěny a tím k vzniku šumu, musí se doména pohnout, na jedné straně dojde k zvětšení a na druhé k smrštění materiálu. Díky tomu dojde k celkové magnetizaci vzorku. [13]

Pokud při pohybu doménové stěny dojde k umístění cívky z vodivého drátu k blízkosti vzorku, dochází ke změně magnetizace. Změna je v cívce indukována jako elektrický impulz, který je zaznamenávaný do počítače, kde se na monitoru zobrazují v křivce. Křivka není plynulá, ale je tvořena z jednotlivých skoků, které vznikají pohybem domén při zavedení magnetické energie. Výslednou křivkou je hysterezní křivka. Pokud dojde ke spojení všech skoků, vzniká šumivý signál, který je označen jako Barkhausenův šum. [13]

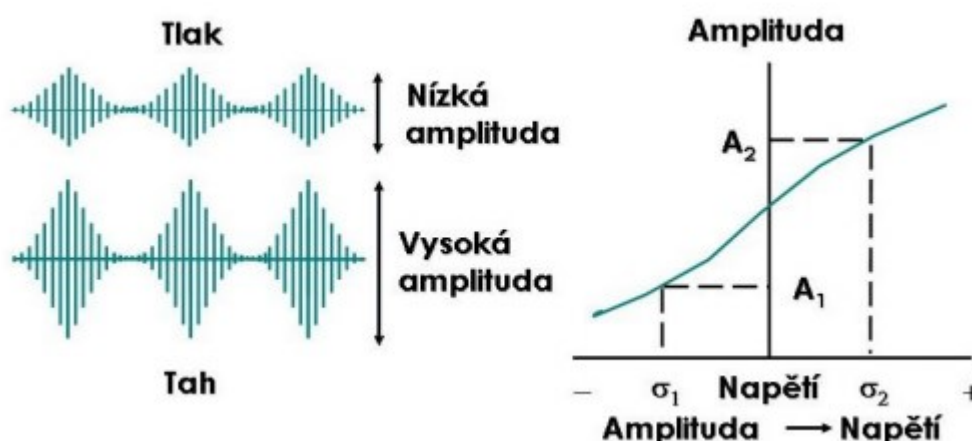


Obr. 2.2 – Hysterezní křivka [14]

Barkhausenův šum má frekvenci, pro většinu materiálu začínajících na magnetizační frekvenci až po 250 kHz. [13]

Důležitý parametr je hloubka měření, která se pohybuje od 0,01 mm až 2 mm. Frekvenční rozsah generovaného signálu, vodivost a permeabilita zkoušeného materiálu jsou faktory, které zásadně ovlivňují hloubku. [15]

Barkhausenův šum se využívá v hodnocení zbytkových napětí, hodnocení mikrostruktuálních změn a pro kontrolu defektů. Magneto-elastické metody také slouží pro klasifikaci měkkých a popálených míst, měkkých hran a oduhličených povrchů. Tlakové napětí u těchto metod vyvolají zmenšení intenzity Barkhausenova šumu. Tahové napětí naopak hodnotu intenzity zvýší. Toho se převážně využívá pro určení zbytkových napětí a také pro určení hlavního směru napětí. [13]

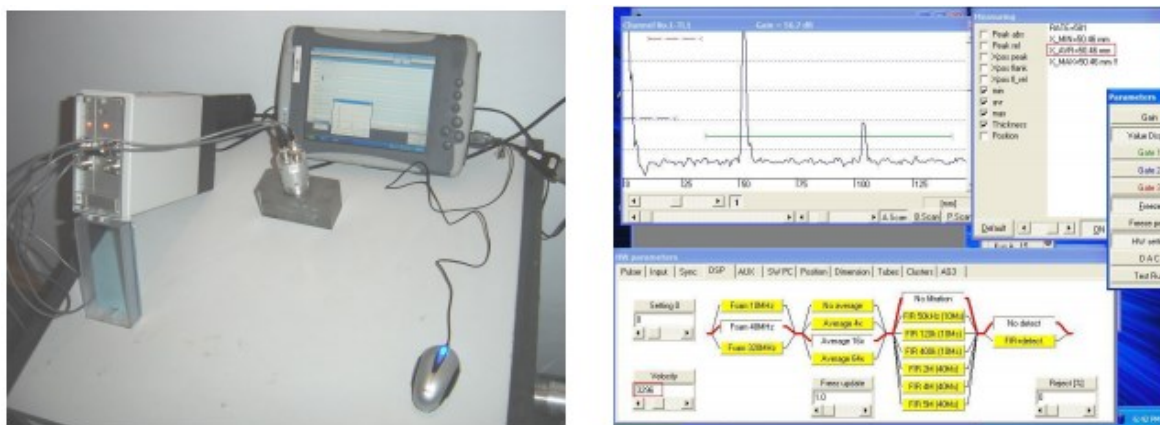


Obr. 2.3 – Vliv napětí na snímaný signál Barkhausenova šumu [14]

3.3.2 Ultrazvuková metoda

Tyto metody využívají různé způsoby šíření ultrazvukových vln a vztahu mezi šířením vln a elastických konstant materiálu. Využity jsou polarizované vlny příčné nebo podélné

a můžeme s nimi měřit napětí v celém průřezu nebo napětí v povrchových vrstvách. Rozdíl hlavních napětí se dá určit pomocí akustického dvojlohu při měření polarizovanými vlnami ve dvou na sebe kolmých rovinách. Při současném měření příčných a podélných vln dochází k eliminaci vstupních hodnot, které dále slouží k výpočtu. Tento jev je způsoben díky tomu, že příčné a podélné vlny se šíří různou rychlostí. [16]



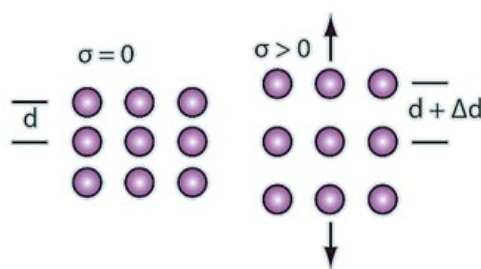
Obr. 2.4 – Měření pomocí ultrazvuku – zařízení EMAT – DIO 2000 [16]

3.3.3 Rentgenová difrakce

Tato metoda patří k nejperspektivnějším, ale díky složitosti měřicího zařízení, vysokým pořizovacím nákladům a vyhodnocováním výsledků není zcela snadná. Slouží k určení typických znaků materiálů a také pro určení kvality. Metoda je vhodná pro různou škálu materiálů. Od kovů, přes plasty, polymery, kapaliny, keramické materiály až po minerály. Rentgenová difrakce slouží k studiu vnitřního uspořádání krystalických látek. Dochází k zjišťování zbytkového napětí, struktury a relaxace, krystalografii, mikrodifrakci a v neposlední řadě ke kvalitativní a kvantitativní fázové identifikaci u výše zmiňovaných materiálů. [18]

Metoda je založena na rentgenovém záření, kde první známky o této metodě sahají do roku 1912. V tomto roce Max von Laue objevil, že krystaly dokážou difraktovat rentgenové záření. [17]

Rentgenová difrakce závisí na struktuře materiálu a také na vzdálenosti krystalografických rovin. Pokud je v materiálu napětí nulové, vzdálenost krystalografických rovin je závislá pouze na vlastnostech materiálu. Pokud dojde ke změně napětí, dochází i k změně vzdálenosti rovin. [18]



Obr. 2.5 – Vzdálenost krystalografických rovin díky změně napětí [18]

Základní charakteristikou rentgenové difrakce je měření mřížkové konstanty krystalu v závislosti od pružné deformace, kde se využívá difrakční záření. Toto měření zaznamenává pouze deformaci, která je úměrná velikosti zbytkového napětí. Paprsek rentgenové difrakce vychází z Braggova zákona, který zní:

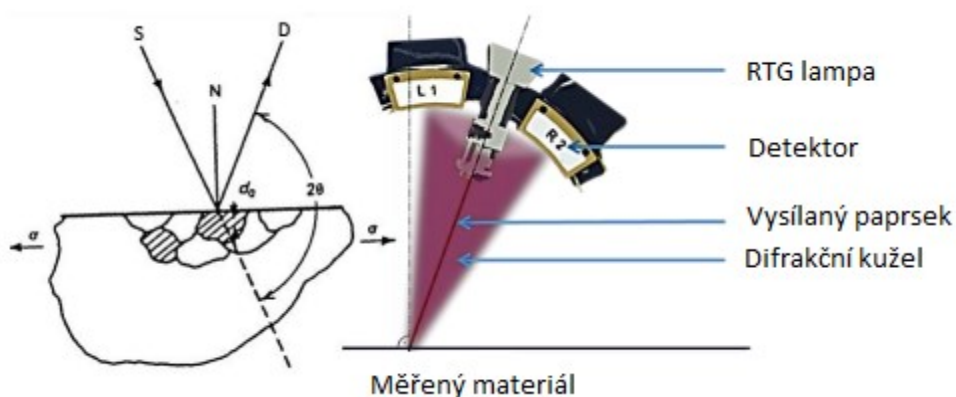
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (1.3)$$

Kde: λ – vlnová délka (n - číslo udávající řád)

d – vzdálenost krystalografických rovin

θ – úhel difrakce [18]

Princip spočívá ve vysílání rentgenového paprsku do měřeného materiálu, kde dochází k difrakci od krystalografických rovin do difrakčního kuželu. Odrazový difrakční kužel je zaznamenáván na plochách detektoru. Omezení této metody spočívá v tom, že je využitelná pouze na krystalické materiály (materiály s krystalickou mřížkou). Nedílnou výhodou této metody je určení naměřených výsledků v absolutních fyzikálních jednotkách (MPa). [18]



Obr. 2.6 – Princip měření rentgenovou difrakcí [18]

4. CAM/CAD systémy

Díky zvyšujícím se požadavkům na výrobu jednotlivých součástí se zvyšuje čas i finanční nároky na výrobu. Díky vývoji nových obráběcích center, technologií a strategií dochází k snížení výrobního času a finanční náročnosti výroby. Obráběcí centra jsou již vybavena adaptivním řízením, aktivní kontrolou, diagnostikou, minimalizací teplotních deformací rámu strojů a identifikací stavu řezných nástrojů v průběhu řezného procesu. Také dokážou pracovat ve dvou až pěti osách. Za nové progresivní technologie výroby forem můžeme považovat vysokorychlostní a suché obrábění. Aby bylo docíleno požadované efektivity výroby, musí tyto technologie dodržet požadované zásady, mezi které můžeme zařadit řezné podmínky, nástroje a zvolené strategie obrábění. Nedílnou součástí k zefektivnění výroby patří i využití CAD/CAM systémů.

4.1 CAM systémy

Zkratka CAM znamená Computer Aided Manufacturing, v překladu řízení výroby s počítačovou podporou. CAM systémů je několik druhů a obecně se dělí na 3 skupiny:

- malé CAM systémy,
- střední CAM systémy,
- velké CAM systémy. [19]

Některé CAM systémy se zaměřují převážně na určité specifické operace jako je dentální a sklenářský průmysl, soustružnické, frézovací, gravírovací nebo řezací operace.

Výběr nejvhodnějšího CAM systému je velmi složitý a musíme brát v potaz několik hledisek. Mezi základní kritéria mimo jiné při výběru CAM systému patří druh a variabilita výroby, strojový park, pořizovací cena, technická podpora při tvorbě programů, dostupnost aktualizací a nástaveb, zkušenosti uživatelů atd. Pro správný výběr systému slouží i různé publikace, které se zabývají porovnáním CAM systémů. [20]

4.2 Strategie CAM systémů

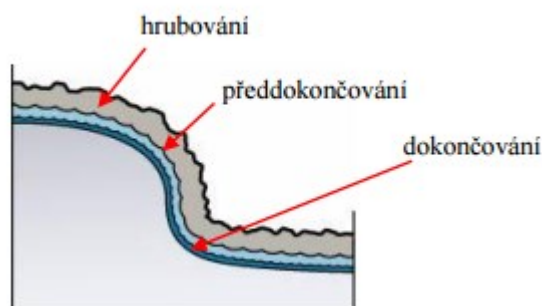
Pod volbou strategie obrábění si představíme předdefinované dráhy nástrojů, které jsou optimalizovány pro tvarově složité plochy a daná součást je obrobena co nejefektivněji. Navrhování a sled jednotlivých drah nástroje je velmi složitý proces, který je popisován v mnoha publikacích. Zabývá se mimo jiné postupem a sledem obrábění, volbou nástrojů a stanovením řezných podmínek. [21]

Vytvářením nových strategií dochází ke generování a optimalizaci způsobu dráhy nástroje po obráběném povrchu součásti. Tento proces vyžaduje znalost teorie obrábění, informatiky a v neposlední řadě matematiky. Mezi nejčastěji používané patří strategie optimalizující řezné podmínky, které mají za účel dodržet konstantní zatížení nástroje. Konstantní zatížení nástroje vede k zvýšení životnosti nástroje a díky tomu dochází i k zhotovení kvalitnějšího povrchu. [21]

Nástroj během procesu frézování vykonává tři druhy pohybů. První pohyb vzniká při pracovním posuvu a dochází k odebrání materiálu. Druhý pohyb vykonává nástroj také pracovním posuvem, ale nedochází k úběru materiálu. Nástroj tento pohyb vykonává nejčastěji při posunování po obrobeném povrchu (přejezdy, nájezdy, výjezdy). Třetím pohybem je tzv. rychloposuv. Jedná se o pohyb, kdy nástroj není v bezprostřední blízkosti obráběného materiálu. Nejčastěji je to odjezd do polohy pro výměnu nástroje. Zkrácením (optimalizací) drah nástroje vede ke snížení času a vyšší produktivitě výroby.

Strategie CAM systému lze rozdělit na tři části:

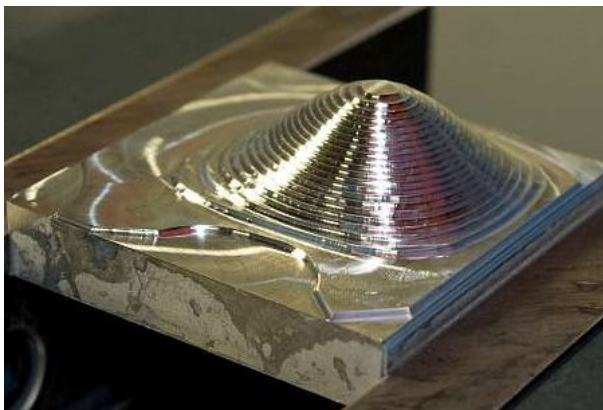
- hrubovací,
- polodokončovací (předdokončovací),
- dokončovací. [22]



Obr. 2.7 – Rozdělení CAM systému [22]

4.2.1 Hrubovací strategie CAM systémů

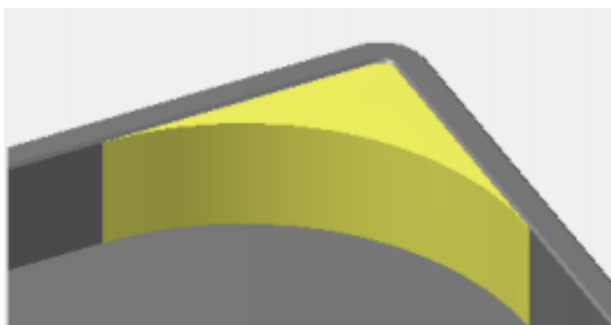
Jedná se o strategie, kdy dochází k úběru maximálního možného objemu materiálu za co nejkratší čas. Nástroj musí mít dostatečně velkou tuhost při tak velkém vyložení, aby nedocházelo k chvění. Pomocí nástroje se zaobleným tvarem břitu, můžeme docílit vyššího přiblížení ke kontuře požadovaného tvaru oproti ostatním nástrojům. Obrábění s těmito nástroji nese i rizika a to v podobě nesnadného procesního řízení – není zajištěna dostatečná procesní spolehlivost. Mezi nejčastěji používané nástroje pro frézování jsou frézovací hlavy s výměnnými břitovými destičkami. [21]



Obr. 2.8 – Součást, která je zhotovena hrubovacími strategiemi CAM systémů [21]

4.2.2 Polodokončovací strategie CAM systémů

Jsou také nazývány jako dohrubovací nebo předdokončovací strategie. Polodokončovací strategie mají za úkol odebrat zbylý materiál, který nebylo možno odebrat hrubovacími strategiemi, nejčastěji z důvodu velikosti hrubovacího nástroje. Využívají se k tomu postupně zmenšující se průměry nástrojů, kdy dochází ke stále menšímu úběru materiálu, dokud není zhotoven rovnoměrný přídavek na dokončování (obrábění). [22]



Obr. 2.9 – Žlutě vyznačená plocha, která bude obrobena pomocí polodokončovacích strategií CAM systémů

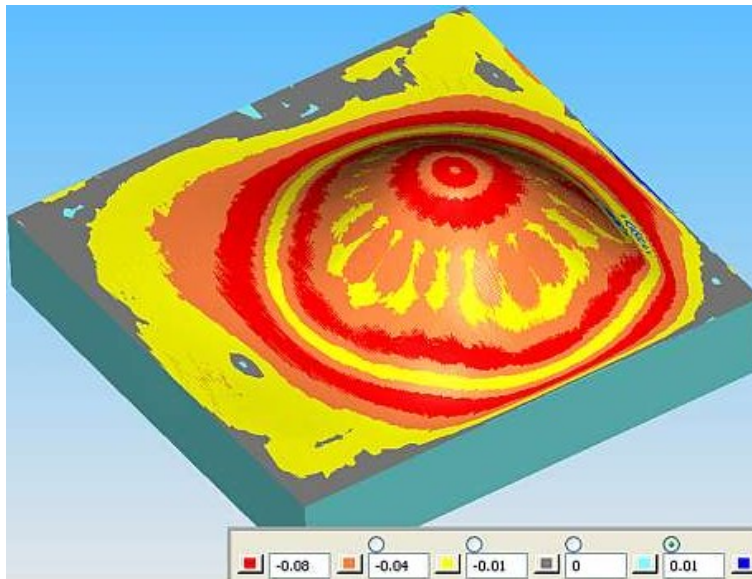
4.2.3 Dokončovací strategie CAM systémů

Tyto strategie závisí na tvarové složitosti obráběné součásti. Jedná se o konečné zhotovení požadovaného tvaru a parametrů součásti. Speciální strategie se využívají pro kouty, rohy, zaoblené přechody. Dráhy nástroje jsou v těchto případech přizpůsobeny podle tvaru součásti. [21]



Obr. 3.0 – Součást zhotovena pomocí dokončovacích strategií CAM systémů [21]

Výsledný obrobek podléhá různým požadavkům. Převážně rozměrové a geometrické přesnosti a kvalitě opracovaného povrchu. Všechny zmíněné požadavky jsou závislé na přesném obrábění, které vede k výrobě nových moderních CNC obráběcích strojů. Nezastupitelnou úlohu zde mají i CAM systémy, které vytváří NC programy tvarově složitých součástí. Slouží nejen jako uživatelské prostředí, ale i k optimalizaci a odladění programu při jeho tvorbě. Většina CAM systémů je vybavena simulací drah nástroje, které nám graficky znázorní a určí např. různé kolize nástrojů nebo grafické porovnání obrobce s modelem. [21]



Obr. 3.1 – Grafické porovnání s modelem součásti [21]

I přes velkou škálu a rozmanitost možností CAM systému, vzniká prostor stále pro zdokonalování a to jak nových, tak i stávajících strategií, zdokonalení grafické simulace a odladění programu přímo v grafické simulaci.

5. Návrh a realizace experimentální činnosti

Cílem práce je porovnat vysoce efektivní frézovací strategie z hlediska povrchového napětí. Experiment byl proveden na dílci z materiálu Toolox 44. Jedná se o materiál, který se vyznačuje vysokou tvrdostí a dobrou obrobitelností. Tvar součásti je navrhnut tak, aby zahrnoval otevřené i uzavřené plochy.

CAM systémů poskytujících hrubovací frézovací strategie je na trhu mnoho. Z dostupných CAM aplikací byly vybrány ty, které obsahují modul umožňující programovat vysoce efektivní frézovací strategie. Pro potřeby uskutečnění experimentu byly osloveny společnosti, které dodávají CAM systém s možností programovat vysoce efektivní frézovací strategie a za vzájemné spolupráce se podílely na tvorbě NC kódu.

Vybraným společností byly poskytnuty veškeré podklady pro výrobu dané součásti. Jedná se o výrobní výkres součásti, 3D model, údaje o materiálu, stroji, řezných nástrojích, upínači součásti a upínači nástrojů. Dále společností byly předloženy doporučené řezné podmínky od výrobce nástrojů.



Obr. 3.2 – Zhotovené součásti (dílce)

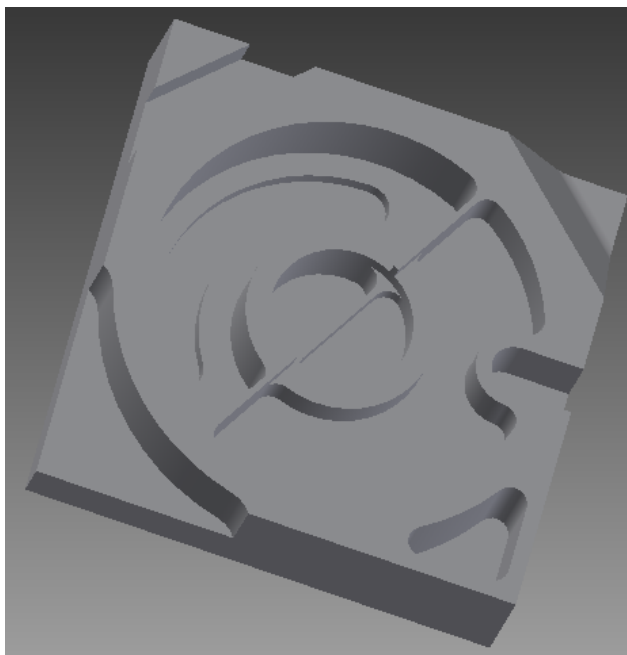
Měření povrchového napětí bylo provedeno rentgenovou metodou s pomocí X-ray difraktometru. Jedná se o nedestruktivní metodu měření a výsledná hodnota napětí se zobrazuje v absolutních hodnotách.

Díky velkým pořizovacím nákladům na toto zařízení bylo měření provedeno ve spolupráci s Katedrou obrábění a výrobní techniky ze Strojnické fakulty Žilinské univerzity v Žilině. Zbytkové napětí bylo měřeno pouze na plochách, které byly obrobeny vysoce efektivními frézovacími strategiemi.

5.1 Polotovar (dílec)

Obráběný dílec obsahuje plochy vhodné obrábět efektivními frézovacími strategiemi. Z toho důvodu jsou na dílci zvoleny tyto plochy:

- kruhová kapsa,
- drážka rovnoběžná se souřadným systémem,
- drážka vychýlená vůči souřadnému systému,
- drážka ve tvaru oblouku,
- kruhové žebro
- tenkostěnné žebro,
- šikmá plocha,
- otevřená plocha.



Obr. 3.3 – Model navrženého dílce

Všechny požadované parametry dílce jsou uvedeny na výrobním výkrese, který je přílohou diplomové práce – Příloha A.

5.2 Materiál dílce - Toolox 44

Pro provedení experimentu byl zvolen materiál Toolox 44. Jedná se o ocel používanou pro výrobu lisovacích forem, forem pro vstřikování plastů, lisovacích nástrojů, tvářecích nástrojů a částí strojů jako jsou například vodící lišty. Formy z tohoto materiálu se používají

převážně pro hromadnou a velkosériovou výrobu u komplikovaných výrobků, kde je kladen důraz na vysokou kvalitu. [23]

Jedná se o kalenou a popouštěnou nástrojovou ocel, která se vyznačuje především velmi nízkým zbytkovým pnutím, dobrou obrobiteľností i přes její vysokou tvrdost, velmi dobrou rozměrovou stabilitou a houževnatostí. Mezi další kladné vlastnosti této oceli patří vynikající leptatelnost a leštitelnost. [23]

Ekvivalentní materiály k této oceli můžeme zmínit 1.2342 a 1.2344. Materiál není vhodný pro další tepelné zpracování. Pokud ocel přesáhne teplotu 590 °C, dochází ke ztrátě vlastností a tyto vlastnosti nejsou zaručeny. Pokud je tepelné zpracování vyžadováno, tak se provádět může, ale nesmí překročit právě zmiňovanou teplotu 590 °C. [23]

Tabulka 1.1 – Chemické složení oceli Toolox44 [24]

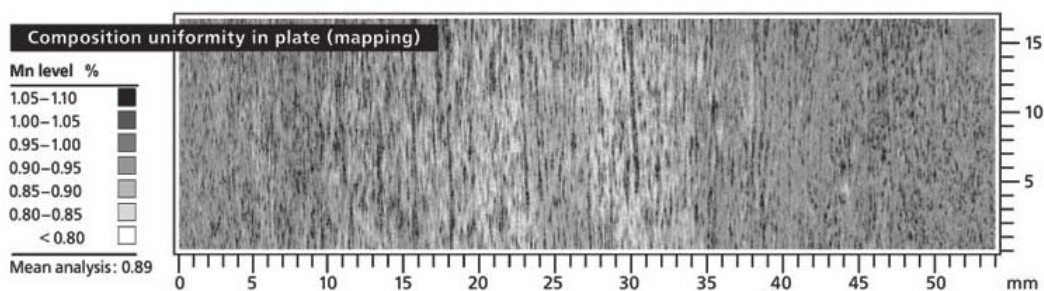
Materiál	Toolox44
C	0,32%
Si	0,6 - 1,1 %
Mn	0,80%
P	max. 0,001 %
S	max. 0,003 %
Cr	1,35%
Mo	0,80%
V	0,14%
Ni	max. 1 %
CE	0,92 -0,96
CET	0,55 - 0,57

Tabulka 1.2 – Mechanické vlastnosti oceli Toolox44 [24]

	20 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
Mez pevnosti R_m [MPa]	1450	1380			
Mez pružnosti $R_{p0,2}$ [MPa]	1300	1200			
Tažnost A_5 [%]	13	10			
Mez pevnosti v tlaku				1060	
$R_{c0,2}$ [MPa]	1250	1120	1120	1060	910
Rázová houževnatost [J]	30	60	80	80	
Tvrdost [HBW]	450				
Tvrdost [HRC]	45				

Tabulka 1.3 – Fyzikální vlastnosti oceli Toolox44 [24]

	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C
Tepelná vodivost [W/mxK]	28	32	29	21
Koef. tepelné roztažnosti [$10^{-6}/K$]	13,5	13,5	13,5	



Obr. 3.4 – Homogenní mikrostruktura oceli Toolox44 [24]

5.3 Obráběcí stoj

Frézovací operace se prováděly na obráběcím stroji MV 184E od firmy QUASER. Jedná se o druhý nejmenší stroj tohoto výrobce. Vertikální obráběcí centrum se vyznačuje vysokou tuhostí s možností přidávat opce. Díky své vysoké tuhosti může stroj pracovat s maximálními výkony po dlouhou dobu při stejně vysoké přesnosti. Stroj je vybaven řídicím systémem Heidenhain TNCi530. Základní parametry toho stroje jsou uvedeny v tabulce 1.4. [25]

Tabulka 1.4 – Základní parametry CNC stroje MV 184E [25]

Parametry		Jednotky	MV 184E
Pracovní stůl		mm	1 200 x 600
Zatížení stolu		kg	500
Pojezd	v ose X	mm	1 020
	v ose Y		610
	v ose Z		610
Výkon hlavního motoru		kW	22
Vysokotlaké chlazení		bar	8/20/50
Kapacita zásobníku		ks	30/48/60
Hmotnost stroje		kg	6 900
Otáčky vřetena		min ⁻¹	10 000/ 12 000/ 15 000/25 000
Kužel ve vřetení			ISO 40/ BT 40
Způsob pohonu vřetena			Lineární motor



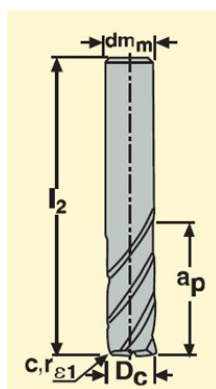
Obr. 3.5 – Obráběcí stroj MV 184E od firmy QUASER [25]

5.4 Řezné nástroje

Nástroje byly zvoleny podle tvaru experimentálního dílu. Jedná se o nástroje hrubovací a dokončovací. Pro zhotovení šikmé plochy je zvolena kulová kopírovací fréza s vyměnitelnou břitovou destičkou. Použité nástroje jsou zvoleny od firmy Seco Tools.

5.4.1 Hrubovací operace

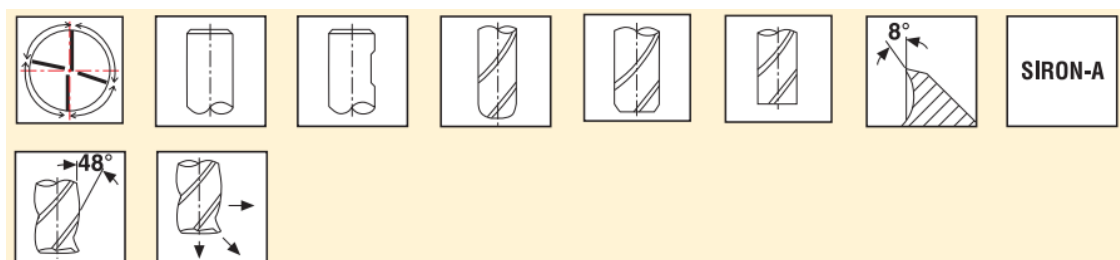
Hrubovací operace byly zhotoveny monolitní hrubovací karbidovou frézou se čtyřmi zuby a válcovou stopkou. Průměr frézy je 12 mm. Nástroj nalezneme u výrobce pod označením 554120R050Z4.3 - SIRON - A. Rozměry nástroje jsou uvedeny v tabulce 1.5.



Obr. 3.6 – Hrubovací nástroj [26]

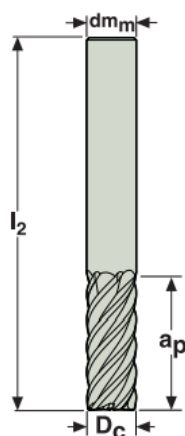
Tabulka 1.5 – Rozměry nástroje [26]

	Rozměry [mm]	Tolerance
D_c	12	e7
dm_m	12	h5
l_2	80	-
a_p	26	-
$r_{\varepsilon 1}$	0,5	$\pm 0,02$

**Obr. 3.7 – Parametry a základní použití hrubovacího nástroje [26]**

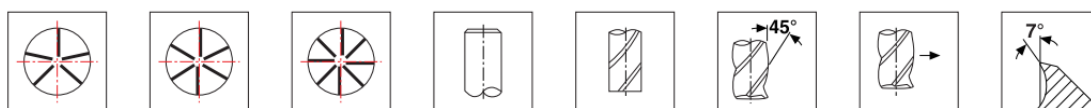
5.4.2 Dokončovací operace

Pro dokončovací operace byla zvolena dokončovací monolitní karbidová fréza s leštěným povlakem, válcovou stopkou a 6 břity. Průměr nástroje je 8 mm. Nástroj nalezneme u výrobce pod označením JS520080D3S.0Z6 - SIRA. Rozměry tohoto nástroje jsou uvedeny v tabulce 1.6.

**Obr. 3.8 – Dokončovací nástroj [26]**

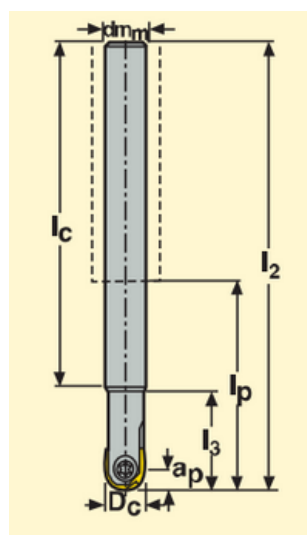
Tabulka 1.6 – Rozměry a tolerance dokončovacího nástroje [26]

	Rozměry [mm]	Tolerance
D_c	8	e7
d_{m_m}	8	h5
l_2	75	-
a_p	30	-

**Obr. 3.9** – Parametry a základní použití dokončovacího nástroje [26]

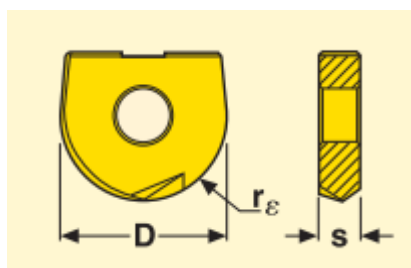
5.4.3 Zhotovení šikmé plochy

Pro zhotovení šikmé plochy je zvolena kulová kopírovací fréza s vyměnitelnou břitovou destičkou o průměru 8 mm. V katalogu firmy Seco Tools tento nástroj nalezneme pod označením jako kulová fréza R219.19-1008.0-04-070. Výměnou břitovou destičku nalezneme v katalogu pod označením VBD 219.19-080-MD03. Rozměry nástroje jsou uvedeny v tabulce 1.7 a rozměry výměnné břitové destičky v tabulce 1.8. Tímto nástrojem byla zhotovena pouze šikmá plocha.

**Obr. 4.0** – Kopírovací kulová fréza [26]

Tabulka 1.7 – Rozměry kulové kopírovací frézy [26]

	Rozměry [mm]
D_c	8
d_{m_m}	10
l_2	110
l_p	70
l_3	23
l_c	85
a_p	9,5

**Obr. 4.1** – Výměnná břitová destička [26]**Tabulka 1.8** – Rozměry břitové destičky [26]

	Rozměry [mm]	Tolerance
D	8	+0 -0,02
s	2	+0,005 -0,010

Ke každému vyrobenému nástroji firma Seco Tools poskytla doporučené řezné parametry. Doporučené řezné parametry pro zvolené nástroje jsou uvedeny v tabulce 1.9.

Tabulka 1.9 – Doporučené řezné parametry pro zvolené nástroje [26]

Operace	Nástroj	Označení	Doporučené řezné podmínky parametry pro standartní operace	
			Do plna:	Boční úběr:
Hrubování	monolitní fréza (4 břity)	554120R050Z4.3-SIRON-A	$a_e = 12\text{ mm}$ $v_c = 120\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $a_p = 9\text{ mm}$ $f_z = 0,06\text{ mm}$	$a_e = 5\text{ mm}$ $v_c = 150\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $a_p = 12\text{ mm}$ $f_z = 0,09\text{ mm}$
Dokončování	monolitní fréza (6 břitů)	JS520080D3S.0Z6-SIRA	$a_e = 0,2\text{ mm}$ $v_c = 175\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $a_p = 25\text{ mm}$ $f_z = 0,04\text{ mm}$	
Dokončení šikmé plochy	kulová fréza D8 (VBD)	R219.19-1008.0-04-070 (VBD 219.19-080-MD03)	$v_c = 150\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ $f_z = 0,12\text{ mm}$ $a_p = 0,4\text{ mm}$ $a_e = 0,4\text{ mm}$	

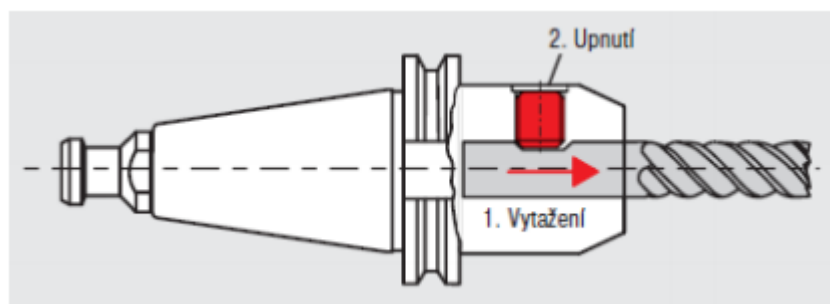
5.5 Upnutí nástroje

Pro experiment jsou zvoleny nástroje pouze s válcovou stopkou. Je kladen důraz na maximální hloubku záběru a to v radiálním i axiálním směru frézování. Proto bylo nutné zajistit dostatečně tuhé upnutí nástrojů. Možností variant upnutí nástroje je mnoho. Mezi nejvíce používaný způsob patří upnutí nástroje do kleštiny. Nevýhodou tohoto upnutí je možné vysunutí nástroje z kleštiny a to zejména díky velkým řezným silám během procesu obrábění. Proto tento způsob není příliš vhodný. Další možnost upnutí nástrojů s válcovou stopkou je upnutí pomocí plošky Weldon. Mezi záporné vlastnosti tohoto upnutí patří obvodové házení a nesprávné (neodborné) upnutí nástroje. Tento způsob upnutí se volí jako náhrada tepelného nebo hydraulického upnutí, kdy pořizovací cena a nároky na obslužné zařízení jsou mnohem přijatelnější.

Upnutí nástroje se provádí tak, že se nástroj vloží do upínače a šroub musí přiléhat na plošku nástroje. Následuje povytáhnutí nástroje, aby šroub přiléhal na zkosení upínací plošky. Následuje dotáhnutí šroubu. Tím nedojde k vytáhnutí nástroje z upínače. Zabránění vytáhnutí nástroje z upínače patří mezi hlavní požadavky tohoto upínače. [27]



Obr. 4.2 – Upínač nástrojů pomocí plošky Weldon [28]



Obr. 4.3 – Upnutí nástroje pomocí plošky Weldon (zabránění vysunutí nástroje z držáku) [29]

5.6 Upnutí obrobku

Upnutí součásti bylo provedeno pomocí svěráku s pohyblivou čelistí. Toto upnutí bylo dostačující pro všechny síly vyvolané nástrojem během celého obrábění.



Obr. 4.4 – Svěrák s pohyblivou čelistí [30]

5.7 Použité frézovací strategie

Společnosti zajišťující dostupnost a technickou podporu CAM systémů v ČR je mnoho. Všechny společnosti dodávají CAM systémy zaměřené na různé technologie obrábění. CAM systémů s možností programování vysoce efektivní strategie frézování je několik. Pro zhotovení NC kódu a pro výrobu experimentálního dílce z materiálu Toolox 44 bylo vybráno šest CAM aplikací, z nichž každá nabízí vysoce efektivní strategii frézování. Na základě oslovení technické podpory u společností zastupující vybraný CAM systém se podařilo za vzájemné spolupráce vytvořit potřebný NC kód. Názvy CAM systémů a vysoce efektivní frézovací strategie jsou uvedeny v tabulce 2.0.

Tabulka 2.0 – CAM systémy a jejich vysoce efektivní frézovací strategie

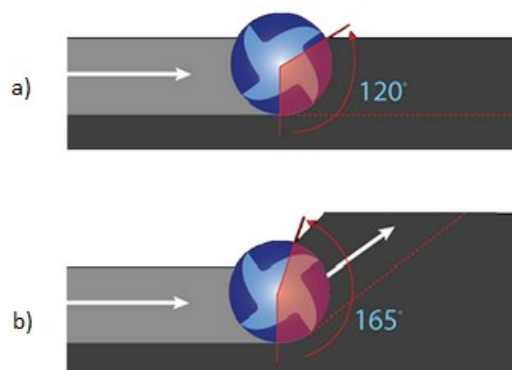
CAM systém	Název vysoce efektivní frézovací strategie
EdgeCAM	Waveform
SolidCAM	iMachining
FeatureCAM	Vortex
HSMWorks	Adaptivní obrábění
SurfCAM	TrueMill
Work NC	Volumill

Po studiu vysoce efektivních frézovacích strategií a výhod uváděných dodavateli CAM systémů mají strategie hned několik možností, jak zvýšit efektivitu výroby hrubováním. Pokud dodržíme řezné parametry doporučené výrobcem řezných nástrojů, vyplývají z použití vysoce efektivní frézovací strategie výhody:

- obrábění celou řeznou délkou nástroje,
- konstantní zatížení nástroje,
- zvýšení životnosti nástroje,
- snížení výrobního času,
- stabilizace obráběcího procesu,
- zvýšení produktivity výroby a stroje aj.

Počátek obrábění vzniká ve středu obráběné plochy, kdy dochází k zavrtání nástroje až na požadovanou hloubku a následně dochází k rozjíždění tvaru ekvidistantou až na požadovaný tvar obráběné plochy. Z toho vyplývá, že hloubka obrábění je maximální. Nástroj odebírá materiál v celé jeho výšce najednou. Zbýlé rohy a záhyby nástroj odebere jako poslední, aniž by došlo k překročení maximálního úhlu záběru. Pod pojmem úhel záběru je myšleno, že nástroj nepřekročí maximální úhel, kterým se dotýká materiálu. Tento úhel je

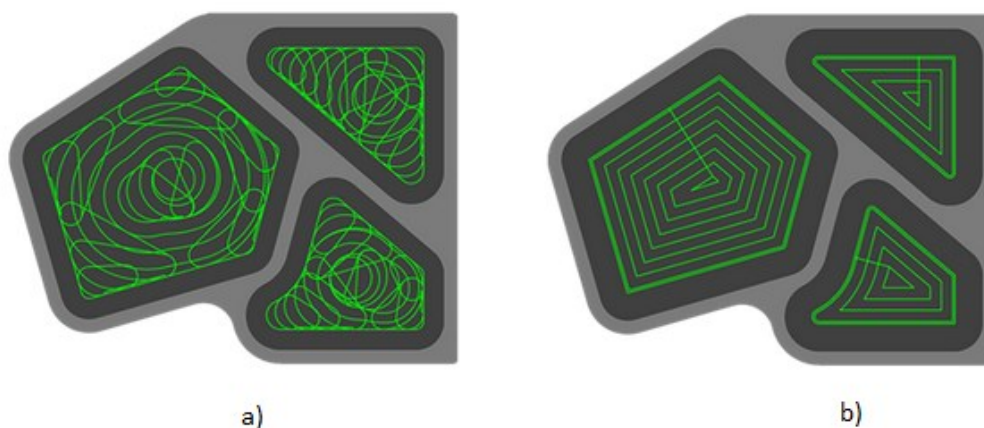
dán předem. Překročení tohoto úhlu vzniká převážně u frézování rohů. Při překročení úhlu záběru dochází k zvýšení zatížení a k chvění nástroje. Díky těmto faktorům dochází ke snížení životnosti a zhoršení tvarové a rozměrové přesnosti. Dále je u těchto strategií kladen důraz na minimální přejezdy a minimalizaci dráhy nástroje a náhlé změny směru nástroje.



Obr. 4.5 – Znázornění úhlu styku nástroje s materiálem

a) úhel styku 120° b) dochází u obrábění např. rohů, nástroj zvětší svůj uhel styku s materiálem [31]

Hlavní rozdíl mezi těmito strategiemi je v programování dráhy nástroje. Každá strategie je vybavena složitým algoritmem pro výpočet dráhy nástroje, kterým je originální. Z obrázku 4.6 je patrný rozdíl z trajektorie nástroje.



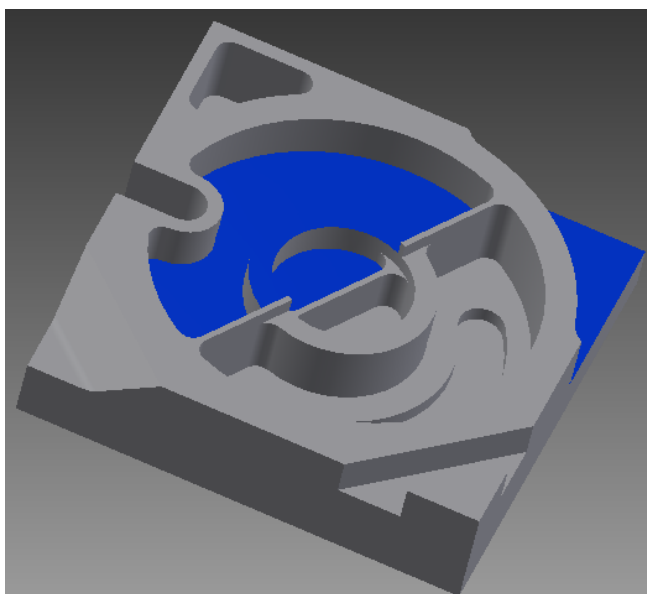
Obr. 4.6 – a) dráha nástroje vytvořená pomocí technologie TrueMill b) tradiční dráha nástroje [31]

6. Měření povrchového napětí

Metod pro měření povrchového napětí je mnoho (přehled nejzákladnějších je zobrazen v tabulce 1.0 v kapitole 3). Některé metody během měření poškodí funkčnost celé součásti, ale jsou i metody, u kterých při měření nedochází k poškození měřené součásti. Metody se také liší získáním výsledných hodnot měření. Některé metody jsou metody porovnávací. To znamená, že výsledky měření se porovnávají se známými hodnotami (např. metoda Barkhausenova šumu).

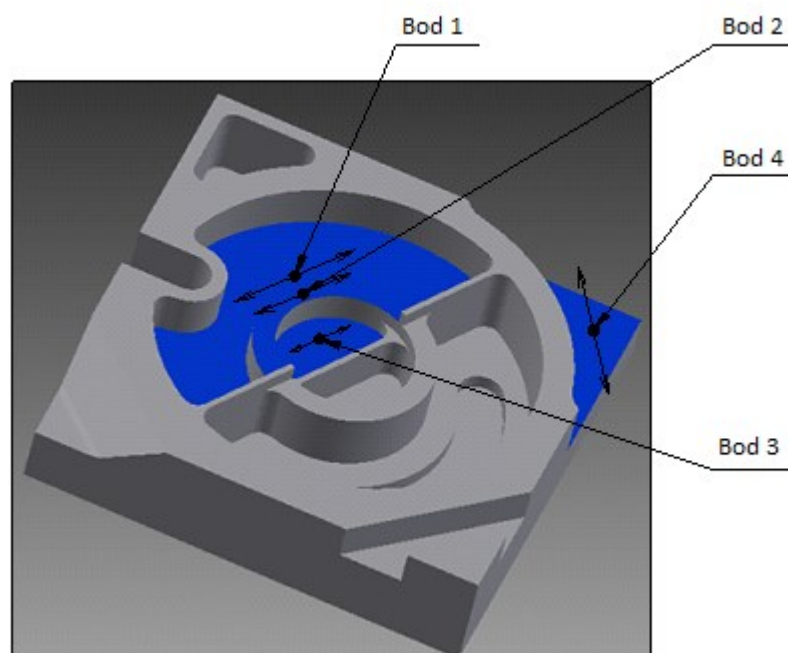
Pro měření experimentu byla zvolena nepříliš rozšířená metoda měření a to převážně díky své finanční náročnosti na pořízení zařízení. Jedná se o nedestruktivní metodu měření X-ray difraktometrem. Tato metoda byla zvolena především díky tomu, že se jedná o nedestruktivní metodu měření, díky své vysoké přesnosti měření a také díky tomu, že výsledek je zobrazen v absolutních jednotkách měření a to nejčastěji v MPa. Měření bylo provedeno ve spolupráci s Katedrou obrábění a výrobní techniky, Strojnické fakulty Žilinské univerzity v Žilině.

Na součásti z materiálu Toolox 44 jsou zvoleny 4 plochy, které jsou vyobrazeny na obrázku 4.7 modře. Jedná se o dvě kruhové kapsy, kruhové žebro a otevřenou plochu. Tyto plochy byly obrobeny vysoce efektivními frézovacími strategiemi.



Obr. 4.7 – Vyznačené plochy, které byly zhotoveny vysoce efektivními strategiemi

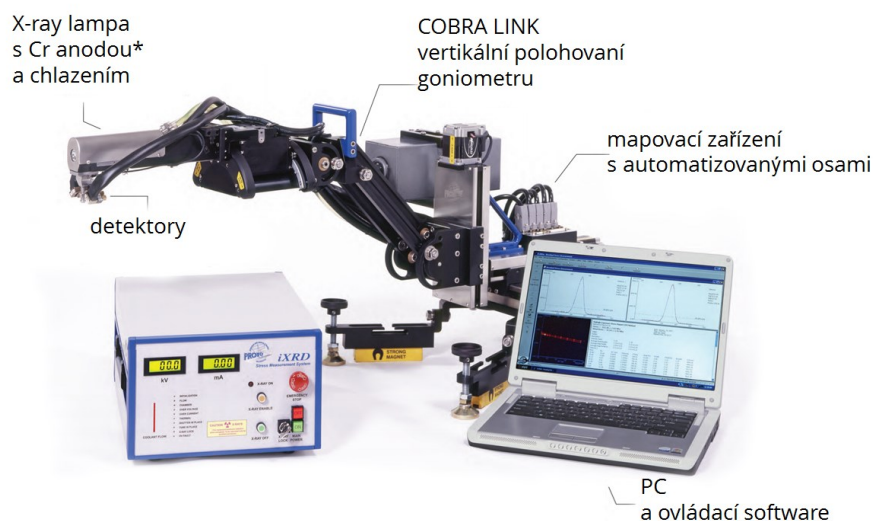
Na těchto plochách (na obrázku 4.7, plochy vyznačené modře) bylo provedeno měření povrchového napětí. Bod, úhel a směr měření musel být nastaven tak, aby nedocházelo k odrazu rentgenového paprsku od jiné plochy, než je požadováno. Popis bodů a směru měření je zobrazeno na obrázku 4.8.



Obr. 4.8 – Znáznornění bodů a směru měření při měření povrchových napětí

6.1 Měřicí zařízení (X-ray difraktometr)

Jedná se o zařízení, kterým docházelo k měření povrchového napětí na daných dílcích. Zařízení je mobilní, proto může být využito pro vědecké účely, ale i pro měření přímo v praxi. Zařízení je také opatřeno magnety. Magnety slouží pro uchycení měřicího přístroje na součásti, která je například kruhového tvaru. Výhodou tohoto přístroje je také jeho vysoká variabilita. Jde měřit různě velké součásti od miniaturních až po velkorozměrové. Mezi další výhodou patří úhlové nastavení detektorů a možnost výměny lampy pro jiný druh měření. Náklady na pořízení jednotlivých lamp jsou velmi vysoké, proto závisí na finančních možnostech daného majitele zařízení. Zařízení je vyobrazeno na obrázku 4.9.

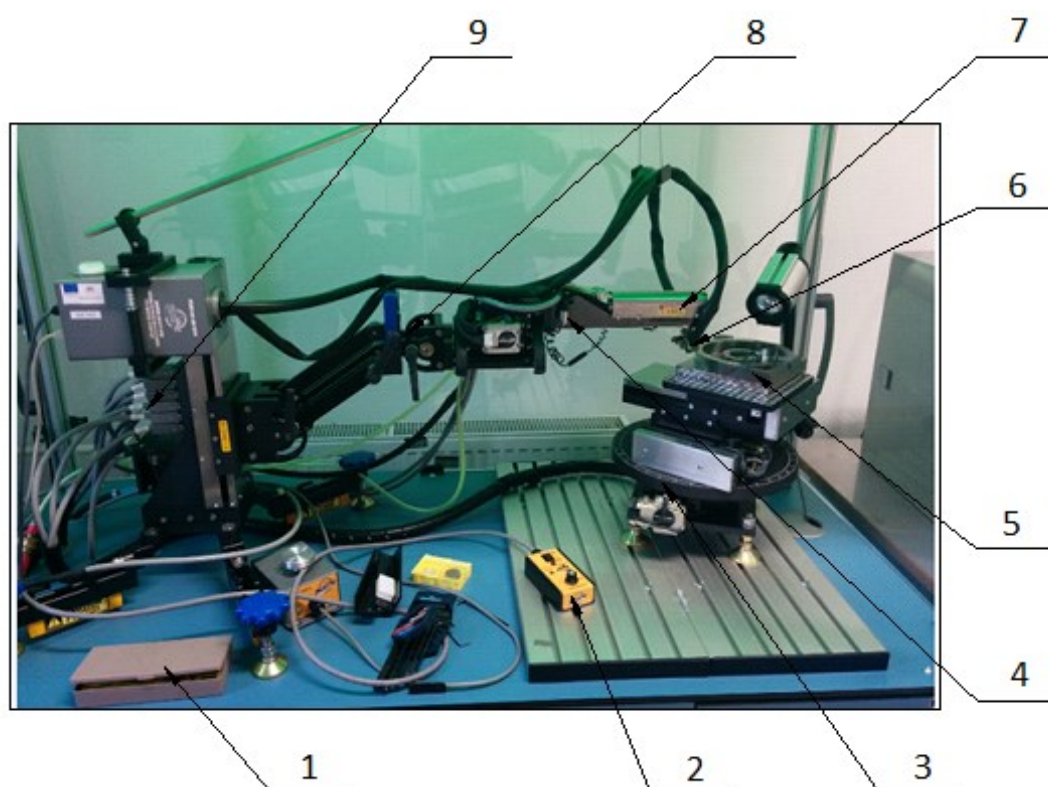


Obr. 4.9 – X-ray difraktometr [32]

Na obrázku 5.0 je detailní vyobrazení zařízení, na kterém bylo měřeno povrchové napětí. Na tomto obrázku je několik odkazů, které popisují základní části měřicí soustavy.

Tyto části jsou:

- 1 – ochranná (úložná) krabice na kolimátory,
- 2 – ovládací zařízení pracovního stolu,
- 3 – pracovní stůl,
- 4 – kalibrační sonda,
- 5 – měřená součást,
- 6 – detektory,
- 7 – rentgenová lampa,
- 8 – rameno přístroje,
- 9 – kabeláž pro přenos dat.



Obr. 5.0 – Měřicí zařízení, na kterém bylo provedeno měření

Samotné měření probíhalo v následném sledu operací:

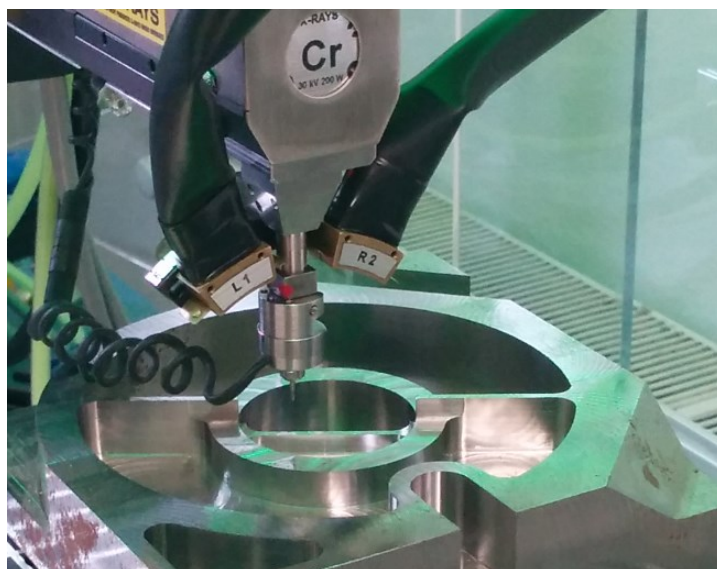
- uvedení přístroje do provozu,
- seřízení přístroje,
- kalibrace přístroje,
- měření a přenos výsledků do PC.

Uvedením přístroje do provozu se rozumí zapnutí a nažhavení rentgenové lampy. Doba nažhavení rentgenové lampy trvá zhruba 30 min.. Při vzniku rentgenového záření vzniká teplo, proto se rentgenová lampa musí chladit. Na přístroji, kterým bylo prováděno měření, docházelo k chlazení H_2O s příměsí fridexu. Tato směs cirkuluje ve svém obvodu. Tento druh chlazení pro zvolený přístroj je dostačující a to zejména díky tomu, že rentgenová lampa je poměrně malá.

Dále následovalo ustanovení součástí na pracovním stole, seřízení úhlu detektoru a zvolení správného kolimátoru. Pro měření všech součástí byl zvolen kolimátor o průměru 1 mm. Tento druh kolimátoru je nejpoužívanější. Zvolený přístroj je opatřen dvěma detektory (levý a pravý), které slouží k zachycení odraženého signálu. Úhly detektorů se nastavují podle druhu materiálu nebo se musí přizpůsobit tvaru součástí. Maximální úhel nastavení detektorů je $+ 30^\circ / - 30^\circ$. S rostoucím úhlem detektorů roste čas a zvyšuje se přesnost měření. U měření součástí z materiálu Toolox 44 byl nastaven úhel $+ 18^\circ / - 18^\circ$. Velikost tohoto úhlu ovlivnilo měření bodu 1. Při měření byl tento úhel maximálně přístupný, při zvětšení úhlu by mohlo dojít k odražení rentgenového paprsku od drážky,

která je rovnoběžná se souřadným systémem. U zbylých bodů byl tento úhel ponechán, aby byly zajištěny stejné podmínky měření. Hloubka měření, vzdálenost do jaké pronikne paprsek rentgenového záření, je 10 μm .

Po nastavení více zmíněných parametrů následovalo určení vzdálenosti mezi měřicí hlavou a povrchem součásti. U zařízení probíhá nastavení automaticky pomocí kalibrační sondy. Nastavení vzdálenosti následovalo u každého bodu. Kalibrační sonda je znázorněna na obrázku 5.1.



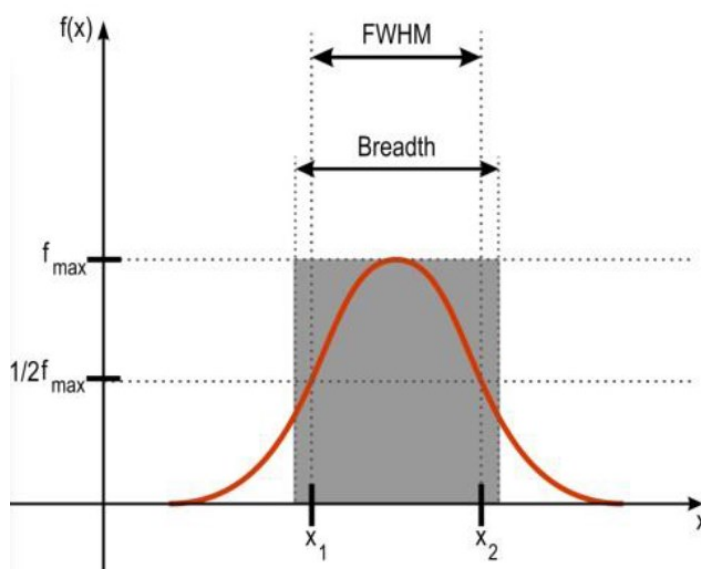
Obr. 5.1 – Nastavení vzdálenosti pomocí kalibrační sondy

Po najetí vzdálenosti následuje samotné měření, při kterém se měřicí hlavice naklápí v určitých úhlech a v těchto úhlech dochází k měření. Úhly, v kterých docházelo při experimentu k měření, jsou zobrazeny v tabulce 2.1.

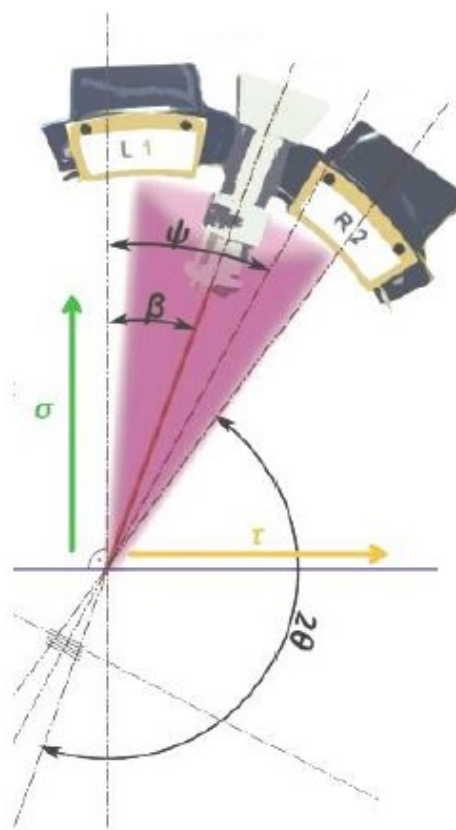
Tabulka 2.1 – Úhly v kterých docházelo k měření

Detektor 1 [°]	Detektor 2 [°]
18	18
14,59	14,59
11,8	11,8
6,52	6,52
1,04	1,04
0	0
-1,04	-1,04
-6,52	-6,52
-11,8	-11,8
-14,59	-14,59

Výsledky měření jsou zpracovány pomocí softwaru XrdWin, kdy díky softwaru dochází k ovládání a analytickému vyhodnocování měření. Naměřené hodnoty jsou zpracovávány v podobě Gaussova rozdělení. Šířka křivky určuje zrnitost materiálu. Čím jemnější je zrnitost materiálu, tím je křivka širší. Naopak čím je užší, tím je zrnitost materiálu vyšší. Tuto hodnotu také během měření zaznamenává hodnota FWHM. Jedná se o celkovou výšku v polovičním maximu. Tato hodnota je jedním ze základních hodnocení Gaussova rozdělení.



Obr. 5.2 – Gaussovo rozdělení



Obr. 5.3 – Vyobrazení úhlů při měření rentgenovou difrakcí

Výsledkem měření není jenom hodnota vzniklého napětí (tahového, tlakového nebo smykového), ale mnoho dalších informací. Mezi tyto informace patří parametry měření, tabulka naměřených hodnot v každém úhlu vychýlení měřicí hlavy, graf zbytkového napětí v integrálních hodnotách a také grafy zbytkového napětí v Gaussově rozdělení. Pro představu a názornou ukázkou je vybrán bod 2 u strategie EdgeCAM, frézovací strategie Waveform a na tomto bodu jsou vyobrazeny všechny výsledky měření.

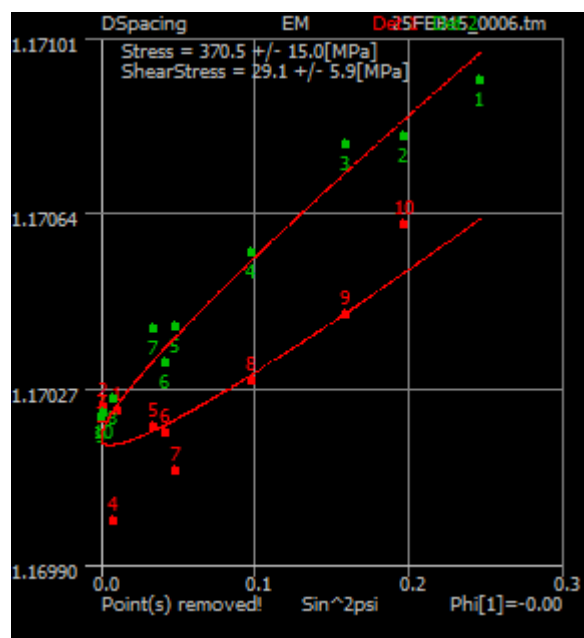
Hodnoty, které jsou měřeny:

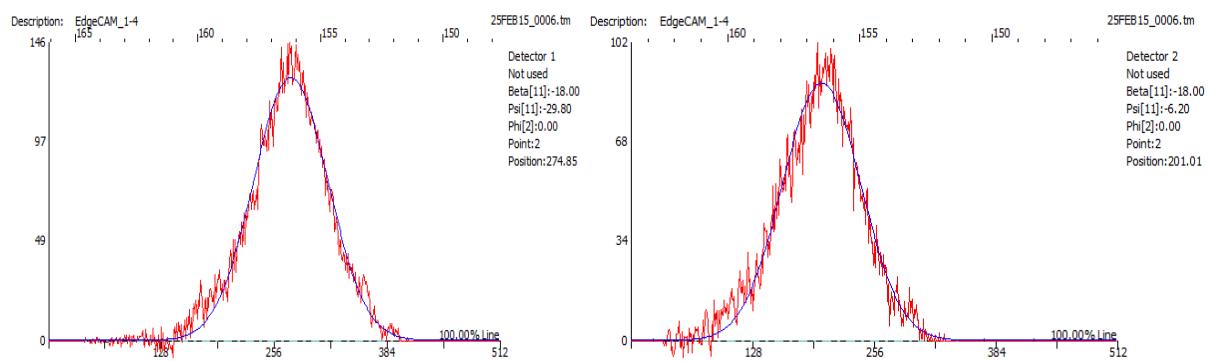
- **Stress – napětí σ** – normálové napětí vzhledem k povrchu měřené součásti. [MPa]
- **Shearstress** – smykové napětí τ . [MPa]
- **β** – beta – úhel naklonění rentgenového paprsku od normály povrchu zkoumaného materiálu. [°]
- **ψ** – psí – jedná se o úhel mezi normálou povrchu a osou úhlu mezi vysílaným a odraženým paprskem. [°]
- **$\sin^2\psi$** – **sin2 ψ** – vyjádření hodnoty funkce $\sin^2\psi$ pro daný úhel ψ . [-]
- **Dspacing – d** – vzdálenost mezi dvěma krystalografickými rovinami. V závislosti na směru a velikosti napětí se tato vzdálenost mění. [nm]
- **2Theta – úhel 2θ** – difrakční úhel (Braggův úhel) definovaný jako úhel mezi vysílaným a přijatým paprskem. [°]
- **Strain*E3** – $\epsilon \cdot 10^3 \rightarrow \epsilon \cdot 10^3 = 103 (d_1 - d_0) / d_0$ – poměrné prodloužení v měřítku 1000:1. [-]
- **FWHM** – Full Width at Half Maximum – „celá šířka při polovičním maximu“, určuje šířku Gaussova rozdělení v polovině výšky celkového vrcholu rozdělení. [°]
- **Breadth** – integral breadth – integrální šířka – šířka pravoúhlého trojúhelníku se stejnou výškou a obsahem plochy jako výška křivky a obsah plochy pod křivkou Gaussova rozdělení. [°]
- **Intensity** – intenzita – intenzita signálu detektoru (početnost na ose X vyjadřuje intenzitu z jednotlivých kanálů). [n]

V tabulce 2.2 jsou uvedeny naměřené hodnoty a to jak z detektoru 1, tak i z detektoru 2. Zbytkové napětí se dá měřit v mnoha veličinách. Jednou z nich je integrální hodnota, která je zobrazena v grafu (viz obrázek 5.4). V neposlední řadě je hodnota zbytkového napětí vnesena do grafu Gaussova rozdělení (obrázek 5.6), kde jsou tyto grafy zobrazeny dva a to právě pro detektor 1 a 2. Pro úplnou ukázkou protokolu měření je tento protokol přiložen v příloze Příloha B.

Tabulka 2.2 – Naměřené hodnoty u strategie Waveform - bod 2

	Beta Angles [°]	Psi [°]	Sin^2psi [-]	Dspacing [nm]	2Theta [°]	Strain*E3 [-]	FWHM [°]	Breadth [°]	Intensity [n]
Detektor 1	18	6,2	0,0117	1,170224	156,4	0,013	2,974	3,43	103,65
	14,59	2,8	0,0024	1,17023	156,4	0,018	3,01	3,37	106,23
	11,8	0	0	1,170206	156,41	-0,002	2,957	3,33	110,63
	6,52	-5,27	0,0084	1,169993	156,51	-0,185	2,683	3,12	114,79
	1,04	-10,75	0,0348	1,170189	156,42	-0,017	2,961	3,31	117,47
	0	-11,8	0,0418	1,170175	156,43	-0,029	3,065	3,35	120,73
	-1,04	-12,84	0,0494	1,170096	156,46	-0,097	2,938	3,45	120,77
	-6,52	-18,32	0,0988	1,170284	156,37	0,064	3,079	3,45	129,16
	-11,8	-23,59	0,1602	1,170426	156,31	0,185	3,004	3,52	131,81
	-14,59	-26,39	0,1975	1,170615	156,22	0,347	3,018	3,49	140,28
Detektor 2	18	29,8	0,2469	1,170915	156,08	0,604	3,104	3,33	123,25
	14,59	26,39	0,1975	1,170799	156,13	0,505	2,819	3,03	144,19
	11,8	23,59	0,1602	1,170783	156,14	0,491	2,877	3,17	138,55
	6,52	18,32	0,0988	1,170555	156,25	0,296	2,768	3	138,4
	1,04	12,84	0,0494	1,170401	156,32	0,164	2,837	3,13	117,88
	0	11,8	0,0418	1,170323	156,36	0,098	2,701	2,91	122,71
	-1,04	10,75	0,0348	1,170395	156,32	0,159	2,969	3,26	110,6
	-6,52	5,27	0,0084	1,170247	156,39	0,033	2,883	3,18	105,45
	-11,8	0	0	1,170211	156,41	0,002	2,951	3,21	107,74
	-14,59	-2,8	0,0024	1,170218	156,41	0,008	2,86	3,21	105,18

**Obr. 5.4** – Zobrazení napětí v integrálních hodnotách u strategie Waveform – bod 2



Obr. 5.6 – Naměřené hodnoty napětí zobrazeny v Gaussově rozdělení u strategie Waveform – bod 2

7. Naměřené hodnoty

Hlavním parametrem pro výsledek tohoto experimentu je napětí. Záleží na jeho působení, jestli je tahové nebo tlakové. Všechny šest součástí bylo proměřeno a hodnoty zaznamenány do tabulky 2.3. Vždy je uveden název CAM systému, strategie a následně bod, u kterého bylo měřeno povrchové napětí a jeho hodnota. Také je zde zaznamenána hodnota smykového napětí. U všech měření je zaznamenána vždy i tolerance měření.

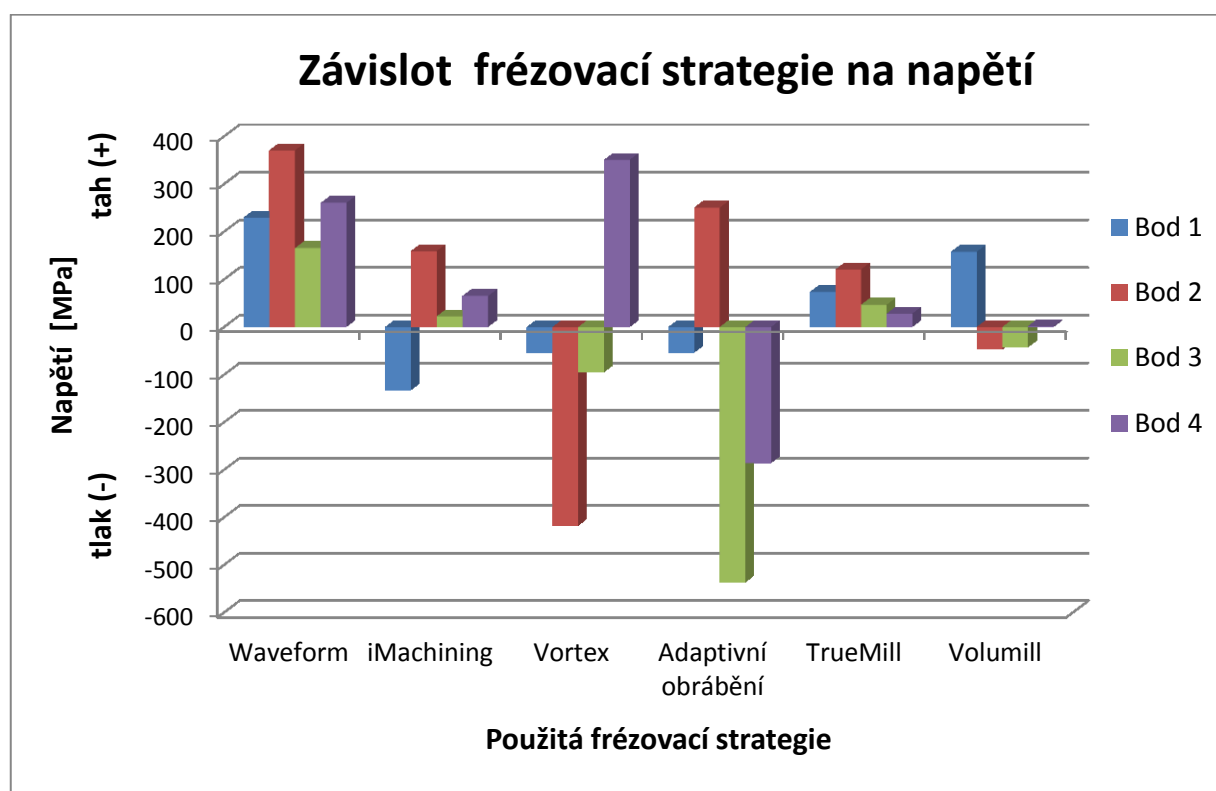
Tabulka 2.3 – Naměřené hodnoty u všech součástí

CAM systém	Frézovací strategie	Zvolené body na součásti	Stress (napětí) [MPa]	Shear Stress (smykové napětí) [MPa]	Average Peak FWHM det 1 [°]	Average Peak FWHM det 2 [°]
EdgeCAM	Waveform	1	+ 229,2 ± 11,8	+ 2,8 ± 4,7	2,960 ± 0,13	2,858 ± 0,14
		2	+ 370,5 ± 15,0	+ 29,1 ± 5,9	2,969 ± 0,11	2,877 ± 0,11
		3	+ 165,6 ± 13,7	- 57,3 ± 5,4	3,043 ± 0,07	2,932 ± 0,11
		4	+ 260,3 ± 14,0	+ 39,1 ± 5,5	3,060 ± 0,16	2,983 ± 0,12
SolidCAM	iMachining	1	- 133,0 ± 12,6	+ 63,9 ± 5,0	2,963 ± 0,11	2,793 ± 0,13
		2	+ 159,1 ± 14,0	+ 15,2 ± 5,5	2,964 ± 0,15	2,780 ± 0,20
		3	+ 22,3 ± 13,6	- 10,7 ± 5,4	2,908 ± 0,12	2,785 ± 0,08
		4	+ 65,0 ± 10,6	+ 68,2 ± 4,2	2,814 ± 0,08	2,765 ± 0,14
FeatureCam	Vortex	1	- 54,6 ± 9,8	- 22,5 ± 3,8	2,681 ± 0,14	2,562 ± 0,13
		2	- 417,6 ± 10,4	- 16,2 ± 4,1	2,742 ± 0,17	2,609 ± 0,15
		3	- 94,9 ± 11,9	+ 34,1 ± 4,7	2,626 ± 0,12	2,423 ± 0,10
		4	+ 350,6 ± 10,1	+ 52,9 ± 4,0	2,654 ± 0,11	2,564 ± 0,16
HSM Works	Adaptivní obrábění	1	- 54,3 ± 13,0	+ 42,2 ± 5,1	2,752 ± 0,32	2,436 ± 0,32
		2	+ 250,2 ± 13,1	+ 49,6 ± 5,1	2,928 ± 0,42	2,312 ± 1,04
		3	- 536,8 ± 21,4	- 27,8 ± 8,4	4,114 ± 0,39	3,576 ± 0,31
		4	- 286,1 ± 20,1	+ 12,0 ± 8,7	2,090 ± 1,85	2,236 ± 0,80

SurfCAM	TrueMill	1	+ 73,1 ± 11,9	+ 13,6 ± 4,8	2,717 ± 0,16	2,727 ± 0,16
		2	+ 120,6 ± 12,5	+ 33,3 ± 5,0	2,875 ± 0,12	2,817 ± 0,11
		3	+ 46,6 ± 22,3	- 30,8 ± 9,0	2,864 ± 0,13	2,666 ± 0,19
		4	+ 28,2 ± 12,4	+ 66,7 ± 4,9	2,815 ± 0,13	2,709 ± 0,13

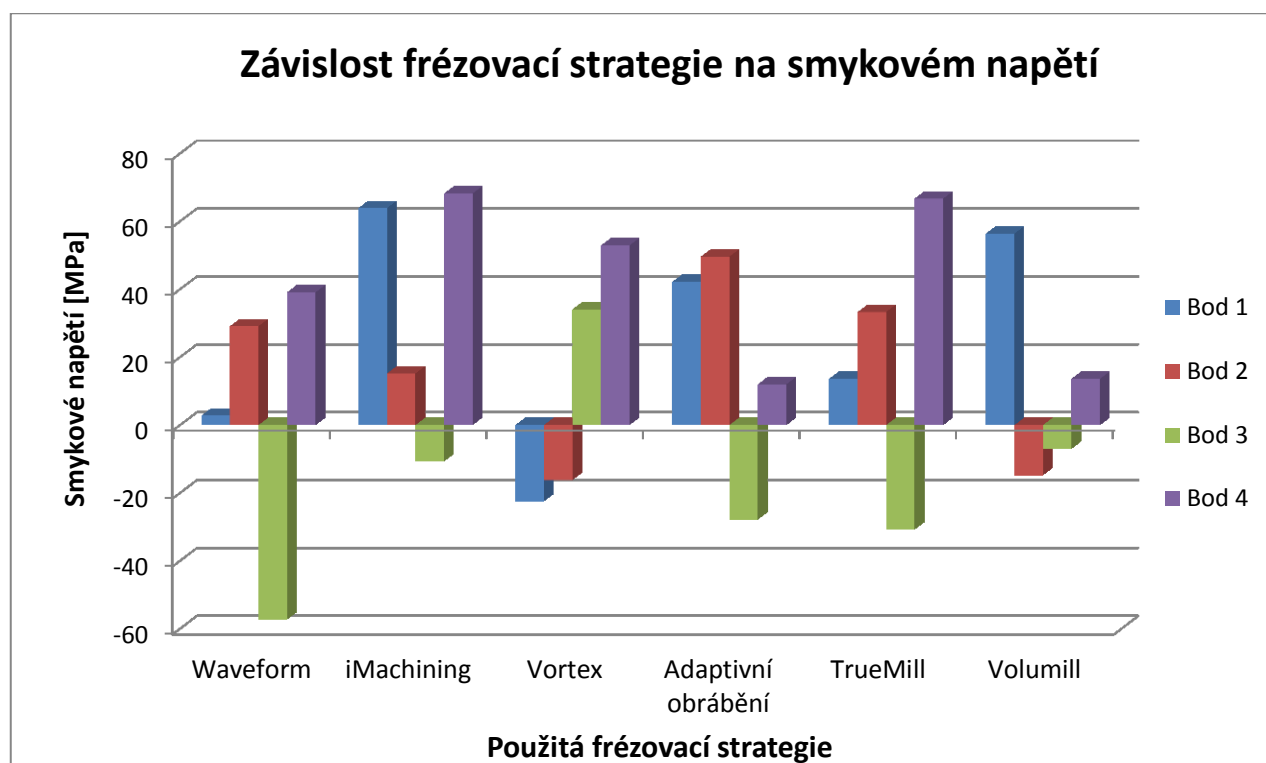
Work NC	Volumill	1	+ 157,5 ± 14,6	+ 56,4 ± 5,9	3,031 ± 0,12	2,965 ± 0,17
		2	- 47,5 ± 9,1	- 14,8 ± 3,5	3,056 ± 0,11	2,954 ± 0,24
		3	- 42,7 ± 14,1	- 7,0 ± 5,6	3,094 ± 0,13	3,084 ± 0,11
		4	+ 1,9 ± 8,4	+ 13,6 ± 3,3	3,043 ± 0,13	2,917 ± 0,11

Z naměřených hodnot jsou vytvořeny grafy. V grafu 1.0 je zaznamenaná závislost vysoce efektivních frézovacích strategie na naměřeném napětí.



Graf 1.0 – Závislost vysoce efektivní frézovací strategie na naměřeném napětí

Další hodnota, která byla naměřena u všech těchto bodů a patří do povrchového napětí, je smykové napětí. Tato hodnota byla také zaznamenávána a pro názornou ukázkou je vyobrazena v grafu 1.1.



Graf 1.1 – Závislost vysoce efektivní frézovací strategie na naměřeném smykovém napětí

Závěr

Cílem práce bylo porovnat vliv vysoce efektivních frézovacích strategií z hlediska vlivu a velikosti zbytkového povrchového napětí. Strategie jsou dostupné v CAM systémech ve formě zásuvných modulů nebo jsou součástí CAM systémů.

Všechny frézovací strategie byly programovány s použitím hrubovacího frézovacího nástroje o průměru 12 mm. Pouze v případě strategie iMachining v SolidCAMu byla použita hrubovací fréza o průměru 12 mm pro zhotovení otvorů, které sloužily pro rozjezd nástroje o průměru 8 mm (dokončovací nástroj byl použit z důvodu praktických zkušeností se strategií iMachining).

Povrchové napětí lze porovnat podle několika hledisek:

- a) velikosti napětí,
- b) směru působení napětí (tahové/tlakové),
- c) velikosti smykového napětí,
- d) porovnání velikosti napětí a směru působení v jednotlivých bodech.

Ad a) Porovnáme-li vzniklé napětí podle velikosti naměřených hodnot (tabulka 2.3), tak z testovaných strategií bylo naměřeno nejmenší povrchové napětí na díle obrobeným strategií Volumill (programováno ve Work NC). Dále následovaly strategie TrueMill, iMachining, Vortex a Waveform. Nejvyšší povrchové napětí bylo naměřeno u strategie Adaptivní obrábění.

Ad b) Pokud provedeme porovnání podle působení směru napětí, tak příznivá tahová napětí byla naměřena na povrchu obrobeným strategiemi Waveform a TrueMill a to u všech bodů.

Tahová napětí byla naměřena i na povrchu po obrobení strategií iMachining kromě měřeného bodu 1 (kruhová kapsa), kde měření prokázalo tlakové napětí.

Na plochách obrobených strategiemi Adaptivní obrábění a Vortex převažovalo tlakové napětí. Měřením v bodě 2 (kruové žebro) u strategie Adaptivní obrábění a bodě 4 (otevřená kapsa) u strategie Vortex bylo naměřeno napětí tahové.

U strategie Volumill bylo naměřeno v bodu 1 (kruhová kapsa) a v bodě 4 (otevřená kapsa) napětí tahové. U bodu 2 (kruové žebro) a 3 (kruhová kapsa) bylo naopak naměřeno napětí tlakové.

Ad c) Z hlediska smykového napětí (tabulka 2.3) a porovnáním naměřených hodnot (graf 1.1) bylo prokázáno, že nejmenší smykové napětí (2,8 MPa) bylo naměřeno v bodě 1 na ploše obrobené strategií Waveform. Naopak nejvyšší naměřená hodnota

smyslového napětí (68,2 MPa) byla naměřena v bodě 4 na ploše obrobené strategií iMachining.

Rozdíl mezi naměřenými hodnotami je velmi malý. Za předpokladu použití dokončovací operace by se hodnoty napětí mohly ještě snížit.

Jelikož jsou naměřené hodnoty smyslového napětí po obrobení ploch efektivními frézovacími strategiemi nízké a rozdíl mezi všemi naměřenými hodnotami je malý, může se výběr strategie z hlediska velikosti smyslového napětí zanedbat.

Ad d) Porovnáním napětí jednotlivých bodů co do velikosti i směru nalezneme v tabulce 2.4.

Tabulka 2.4 – Velikosti nejnižších a nejvyšších naměřených hodnot napětí

Bod	Nejmenší naměřená hodnota napětí				Nejvyšší naměřená hodnota napětí			
	Tahová napětí (+) [MPa]		Tlaková napětí (-) [MPa]		Tahová napětí (+) [MPa]		Tlaková napětí (-) [MPa]	
	Číselná hodnota	Frézovací strategie	Číselná hodnota	Frézovací strategie	Číselná hodnota	Frézovací strategie	Číselná hodnota	Frézovací strategie
1 (Kruhová kapsa)	73,1	TrueMill	54,3	Adaptivní obrábění	229,2	Waveform	133	iMachining
2 (Kruhové žebro)	120,6	TrueMill	47,5	Volumill	370,5	Waveform	417,6	Vortex
3 (Kruhová kapsa)	22,3	iMachining	42,7	Volumill	165,6	Waveform	536,8	Adaptivní obrábění
4 (Otevřená kapsa)	1,9	Volumill	286,1	Adaptivní obrábění	350,6	Vortex	286,10	Adaptivní obrábění

Z tabulky 2.4 vyplývá, že pro každý bod (plochu) by bylo vhodné použít jinou efektivní frézovací strategii. To by bylo ovšem z praktického hlediska velmi náročné a z pohledu uživatele pouze obtížně realizovatelné.

Za povšimnutí však stojí bod 2 (kruhové žebro), kdy docházelo k obrábění z obou stran a výrazně se zde projevil vliv frézovacích strategií na velikost povrchových napětí.

Závěry pro praxi

Experiment prokázal, že obráběním efektivními frézovacími strategiemi dochází k rozdílnému působení na povrchové napětí po frézování materiálu Toolox 44.

Z výsledků experimentu je patrné, že strategie Volumill programována v CAM systému Work NC, má nejmenší vliv na povrchová napětí.

Z praktického pohledu je to výhodné, jelikož je tato strategie dostupná ve formě zásuvného modulu a je možné ji integrovat do CAM systémů: CAMWorks, GibbsCAM, CimatronE, PTC Creo, SIEMENS NX, CAM Express, DMG Mori, HyperMill, NCL, TopSolid Cam, zatímco ostatní vybrané strategie mohou být součástí pouze CAM systémů vyvíjených stejnou společností.

Všechny naměřené hodnoty povrchového napětí jsou měřeny po hrubovacích operacích. K snížení těchto hodnot napomáhá použití dokončovacích metod obrábění. Pokud se hodnota povrchového napětí po hrubování pohybuje kolem 100 MPa, lze dokončovacími metodami výrazně snížit zbytkové napětí.

Doporučení pro další zkoumání

Nejde jednoznačně určit, které napětí je nejvýhodnější. Vyhodnocení vzniklého napětí záleží na výrobě a použití dané součásti. Při procesu obrábění jsou považována za vhodnější napětí tlaková a to zejména díky menší náchylnosti ke korozi, trhlinám a jiným nežádoucím změnám. Tlaková napětí také vedou k zvýšení životnosti součásti, díky tomu se u některých součástí provádí válečkování nebo kuličkování, kdy dochází k vnesení právě tlakových napětí do povrchových vrstev součásti.

Z pohledu dalších experimentů a zkoumání efektivních frézovacích strategií by bylo vhodné zaměřit se na opotřebení nástrojů, dosaženou tvarovou a rozměrovou přesnost, drsnost povrchu a strojní čas, i když je porovnání časů výroby součástí zavádějící. Během experimentu byla doba obrábění některých dílů delší, zatímco nástroj vykazoval po přezkoumání mikroskopem minimální opotřebení oproti součástem vyrobených v kratším čase.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Marku Pagáčovi za odborné vedení, cenné rady, připomínky při vypracování mé diplomové práce a také za ochotu a trpělivost při konzultacích.

Poděkování patří také Katedře obrábění a výrobní techniky, Strojnické fakulty Žilinské univerzity v Žilině, kde probíhalo měření experimentální části práce.

Seznam použité literatury

- [1] BUMBÁLEK, L. *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*, CERM Brno, 2004
- [2] KOČMAN, K. PROKOP, J. *Technologie obrábění. 2. vydání*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [3] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. Kvalita a geometrická specifikace produktů*. Brno: VUT v Brně, 2005. ISSN 1801-5352.
- [4] Martikáš, J. *Obrábanie kalených materiálov sústružením*, Disertační práce, Žilina, 2007
- [5] BÁTORA, B., VASILKO, K. *Obrobené povrchy. Technologická dedičnosť, funkčnosť*. Trenčianska univerzita v spolupráci s vydavateľstvom GC Tech, 2000; ISBN 80-88914-19-1
- [6] DRBÚL, M. ŠAJGALÍK, M. ŠEMCER, J. CZÁNOVÁ, T. PETŘKOVSKÁ, L. ČEPOVÁ, L. *STROJÁRSKA METROLÓGIA A KVALITA POVRCHOV VYTVORENÝCH TECHNOLOGIAMI OBRÁBANIA*. ŽU v Žiline, Strojnícka fakulta, Katedra obrábania a výrobnjej techniky, 2014, 115 s.
- [7] VLK, M.; HOUFEK, I.; HLAVOŇ, P.; KREJČÍ, P.; KOTEK, V.; KLEMENT, J. *EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKA* [online]. Brno, 2003 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium_/opory/Experimentalni_mechanika.pdf
- [8] KRÁLOVÁ, M. *Poruchy krystalové mřížky*: Techmania [online]. 2008 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=597
- [9] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie. 1. vyd.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, 86 s. ISBN 80-248-1209-6.
- [10] MITAŠ, R. *Hodnocení jakosti dílů forem v závislosti od podmínek výroby*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce doc. Ing. Imrich Lukovics CSc.
- [11] ŠVANTNER, M. *Odvrtávací metoda pro měření zbytkových napětí ve výzkumu a v průmyslu*. Plzeň, 2013. Seminář projektu „INTEGRITA“ na FS VŠB-TU Ostrava. Západočeská univerzita v Plzni.
- [12] ČEP, R. ZBYTKOVÁ POVRCHOVÁ NAPĚTÍ PO OBRÁBĚNÍ. Ostrava, 2010. Výuková opora. VŠB-TU Ostrava.
- [13] OCHODEK, V. *Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. In. 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing*, ICBM 6, 9-10 July 2007, Valenciennes, University of Valenciennes, France, ISBN 951-98400-7-9.

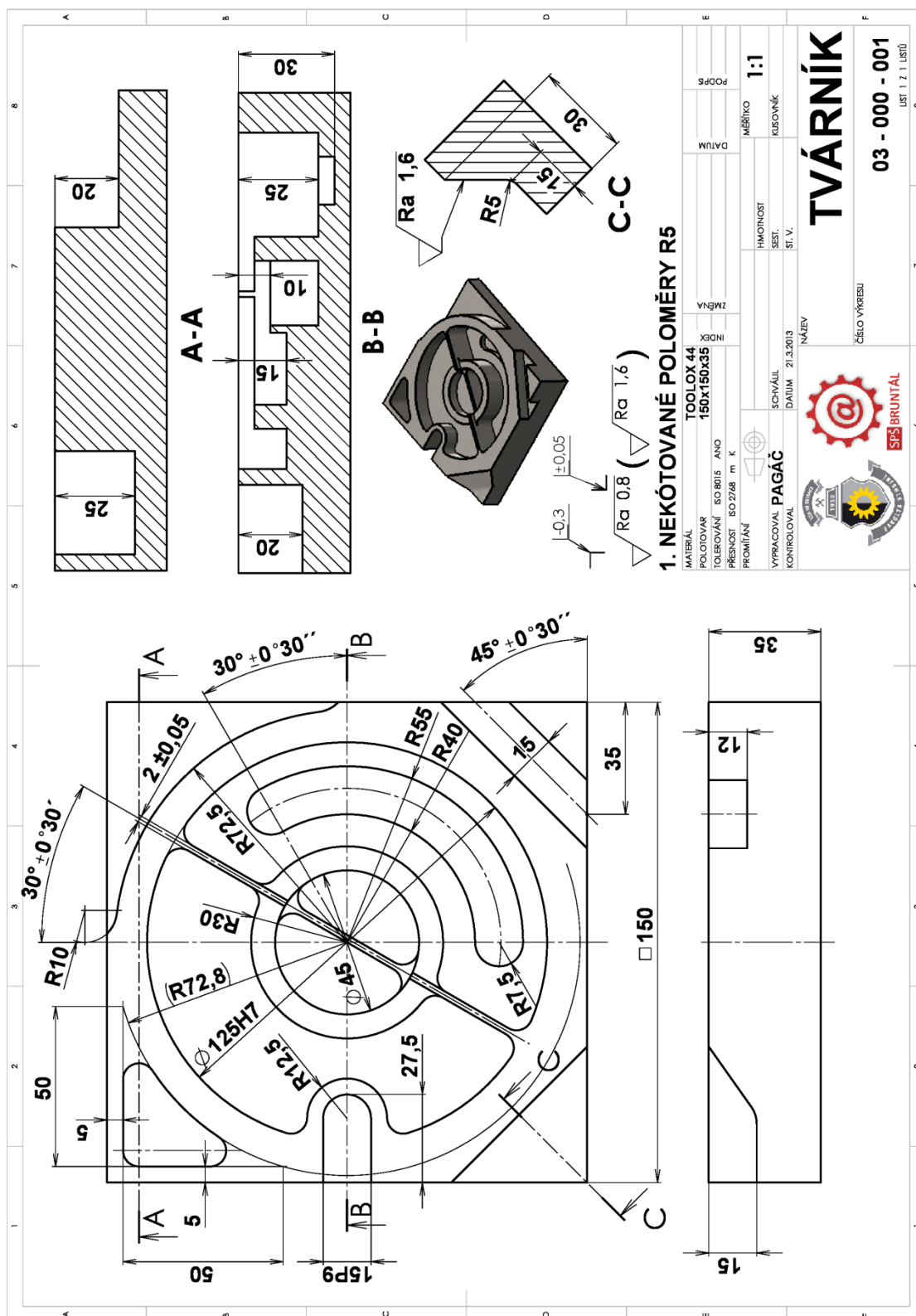
- [14] SCHMIDOVÁ, L. *ANALÝZA INTEGRITY POVRCHU BROUŠENÝCH OZUBENÝCH KOL POMOCÍ ANALÝZY BARKHAUSENOVA ŠUMU A RENTGENOVÉ DIFRAKCE*. Liberec, 2013. 2. mezinárodní podzimní škola povrchového inženýrství. Technická univerzita v Liberci.
- [15] TÖNSHOFF, H.; K., KARPUSCHEWSKI, B. *Residual stress determination of ferromagnetic sheets*. Technické informace a aplikační zprávy o spektrometrech a o přístrojích pro detekci strukturních a napěťových změn v materiálech. Žďár nad Sázavou, 2004, [cit. 2015-01-14].
- [16] VÁCLAVÍK, J. BUNDA, Z. BOHDAN, P. WEINBERG, O. *APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ*. Plzeň, 2012. Článek. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálu a strojírenské metalurgie.
- [17] CULLITY, B. D., STOCK, S: R. *Elements of X-ray diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1956.
- [18] Proto Manufacturing. www.protoxrd.com. Dostupné online [cit. 2014-11-28]
- [19] SADÍLEK, M. *Počítačová podpora výroby*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2011. 80 s. ISBN 978-80-248-2738-4
- [20] BRYCHTA, J, SADÍLEK, M. ČEP, R. PETRŮ, J. *Progresivní metody v obrábění*. Ostrava, 2011. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [21] IŽOL, P. ĎURÍČEK, M. *CAM systémy a hodnocení strategií obrábění* [online]. 2008 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2385-cam-systemy-a-hodnoceni-strategii-obrabeni.html>
- [22] SADÍLEK, M. SADÍLKOVÁ, Z. *POČÍTAČOVÁ PODPORA PROCESU OBRÁBĚNÍ*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2770-4.
- [23] PRECIZ, s.r.o.: *Toolox44* [online]. 2012 [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/Toolox44>
- [24] Kovintrade Praha s.r.o.: *Technické informace TOOLOX 44* [online]. [cit. 2014-12-21]. Dostupné z: <http://www.kovintrade.cz/web/uploads/images/soubory/Toolox44.pdf>
- [25] Mach Trade s.r.o.: *Vertikální obráběcí centra QUASER MV 184* [online]. 2012 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.machtrade.cz/cs/vertikalni-obrabeci-centra-quaser/mv-184>
- [26] Seco Tools. *Machining Navigator*. [on-line]. [cit. 2013-20-04]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews1_2012/MN/GB_Catalog_Update_2012-1_Inlay_LR.pdf>.
- [27] DVOŘÁK, L. *Větší bezpečnost při upínání nástrojů*. MM Průmyslové spektrum. Říjen 2008, č. 10, str. 48-49. ISSN 1212-2572
- [28] MT nástroje i-frezy.cz. *Weldon upínače*. [on-line]. [cit. 2013-21-04]. Dostupné z: <<http://www.i-frezy.cz/i-frezy/eshop/21-1-Weldon-upinace>>.

- [29] SERVUS, T. *TRENDY VÝVOJE UPÍNÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ*. Brno, 2009. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAREL OSIČKA.
- [30] *JÍŠA nářadí* [online]. 2012 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.jisa-naradi.cz/produkty/526-upinaci-naradi/526-strojni-sveraky/526-strojni-sverak-s-nastavitelnou-pohyblivou-celisti.html>
- [31] *TRUEMill - True Engagement Milling* [online]. 2011 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.truemill.com/content/truemill-true-engagement-milling>
- [32] PAGÁČ, M. PETRŮ, J. KRATOCHVÍL, J. *Optimization of cutting conditions for Longitudinal external turning on CNC turning center SKT 100*. Bulharsko. 6th International Seminar. Sozopol: Technical University Sofia, 2012, p. 72 – 80. ISSN 1313-4264.

Seznam příloh

Příloha A	Výkres dílce z materiálu Toolox 44.
Příloha B	Protokol z měření u bodu 2 – EdgeCAM, frézovací strategie Waveform.

Příloha A



Příloha B

STRESS REPORT

File name: EdgeCAM_2.tn
 Gain file: D:\Ostrava_Frézovanie\25FEB15_0004.Gain
 User: KOVT
 Date: February, 25, 2015, 12:35:12
 Description: EdgeCAM_2
 Job #:
 Part #:

Beta Angle[11]: ; X = -358.63; Y = 11.43; Z = -10.32

Stress = 370.5 ± 15.0 MPa

ShearStress = 29.1 ± 5.9 MPa

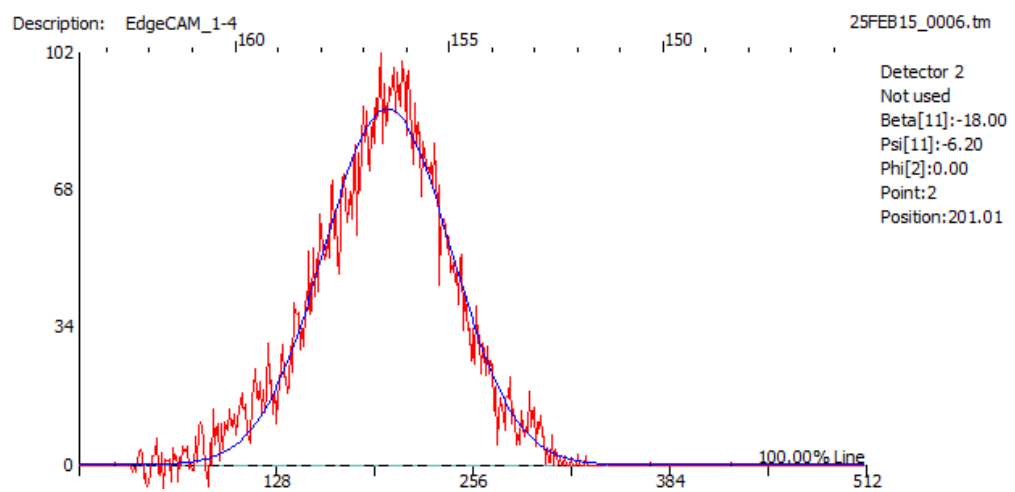
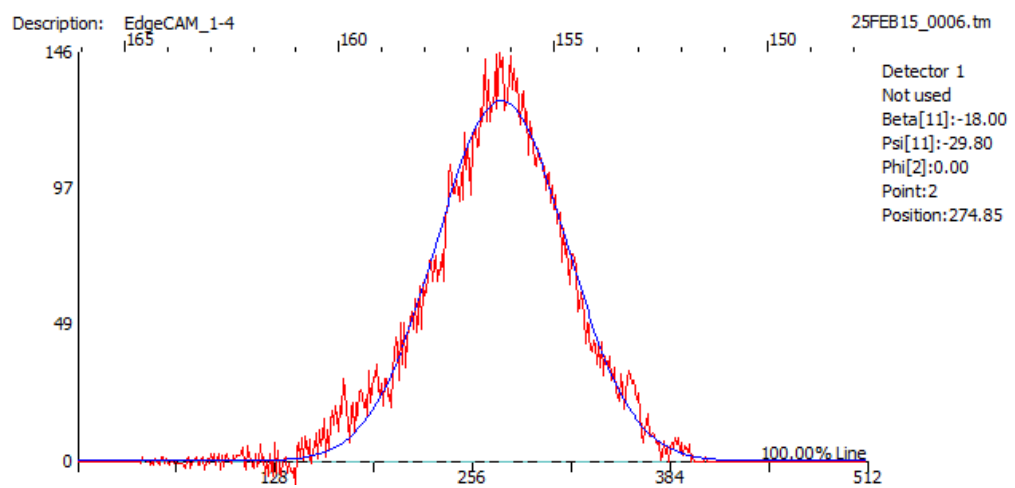
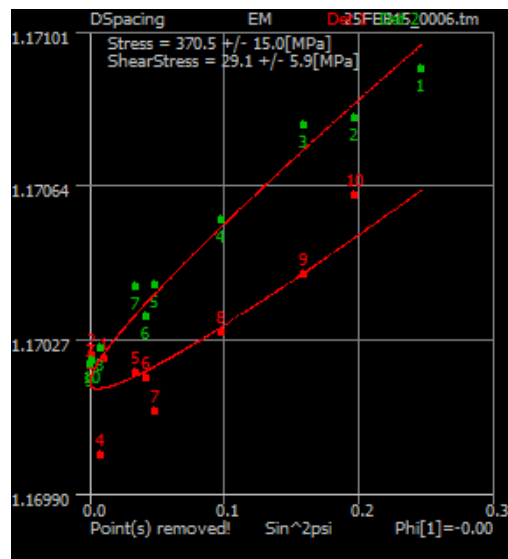
Intensity Ratio: 1.35 1.37
 Average Peak Breadth: 3.38 ± 0.12 3.14 ± 0.13
 Average Peak FWHM: 2.969 ± 0.11 2.877 ± 0.11

Detector : 1

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
18.00	6.20	0.0117	1.170224	156.40	0.013	2.974	3.43	103.65
14.59	2.80	0.0024	1.170230	156.40	0.018	3.010	3.37	106.23
11.80	-0.00	0.0000	1.170206	156.41	-0.002	2.957	3.33	110.63
6.52	-5.27	0.0084	1.169993	156.51	-0.185	2.683	3.12	114.79
1.04	-10.75	0.0348	1.170189	156.42	-0.017	2.961	3.31	117.47
0.00	-11.80	0.0418	1.170175	156.43	-0.029	3.065	3.35	120.73
-1.04	-12.84	0.0494	1.170096	156.46	-0.097	2.938	3.45	120.77
-6.52	-18.32	0.0988	1.170284	156.37	0.064	3.079	3.45	129.16
-11.80	-23.59	0.1602	1.170426	156.31	0.185	3.004	3.52	131.81
-14.59	-26.39	0.1975	1.170615	156.22	0.347	3.018	3.49	140.28

Detector : 2

Beta Angles	Psi	Sin^2psi	DSpacing	2Theta	Strain*E3	FWHM	Breadth	Intensity
18.00	29.80	0.2469	1.170915	156.08	0.604	3.104	3.33	123.25
14.59	26.39	0.1975	1.170799	156.13	0.505	2.819	3.03	144.19
11.80	23.59	0.1602	1.170783	156.14	0.491	2.877	3.17	138.55
6.52	18.32	0.0988	1.170555	156.25	0.296	2.768	3.00	138.40
1.04	12.84	0.0494	1.170401	156.32	0.164	2.837	3.13	117.88
0.00	11.80	0.0418	1.170323	156.36	0.098	2.701	2.91	122.71
-1.04	10.75	0.0348	1.170395	156.32	0.159	2.969	3.26	110.60
-6.52	5.27	0.0084	1.170247	156.39	0.033	2.883	3.18	105.45
-11.80	0.00	0.0000	1.170211	156.41	0.002	2.951	3.21	107.74
-14.59	-2.80	0.0024	1.170218	156.41	0.008	2.860	3.21	105.18



PARAMETERS*Material* : STEEL - FERRITIC (Cr_Ka) (BCC, hkl-211)*Tube*: Cr_K-Alpha*Wavelength*: 2.291*KV*:20.00; *mA*:4.00*Beta Osc*:0.00; *Phi Osc*:0.00; *X Osc*:0.00; *Y Osc*:0.00;*Exp. time*: 2.00 2.00*Nr of exp*: 20 20*Aperture* : 1*Filters* :**Background static fit:***LeftStartPixel* : 115 40*RightStartPixel*: 394 309*ROI Left*: 124 52**Comments:***Units*: MPa*Bragg Angle*: 156.41*Peak Location* : Gaussian 100%*Gain Correction*: P/G(s)*PeakShift*: Absolute Peak*(1/2)S2*:5.92 E-6 [1/MPa] *-S1*:1.28 E-6 [1/MPa]*DSpacing (Angstroms)*: 1.1702087*LPA Correction*: YES*Psi Zero Assignment (Pixel)* : 269.27 201.59*LeftStopPixel* : 125 50*RightStopPixel* : 404 319*ROI Right* : 411 323